



Fernando Jorge Fernandes Teixeira

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

**Paineis Fotovoltaicos: Caracterização
Eléctrica Automática e Procura do Ponto
de Máxima Potência**

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores, pela Universidade Nova
de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Orientador : Mário Ventim Neves

Júri:

Presidente: Prof. - Anikó Katalin da Costa

Arguentes: Prof. - Stanimir Stoyanov Valtchev



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2015

Paineis Fotovoltaicos: Caracterização Eléctrica Automática e Procura do Ponto de Máxima Potência

Copyright © Fernando Jorge Fernandes Teixeira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha mãe, Deolinda Fernandes Teixeira, ao meu pai Virgílio Dias Teixeira, à minha irmã Kátia, ao meu irmão Cláudio, ao meu tio José Teixeira e a todos os meus familiares pelo apoio total que sempre me deram ao longo da minha vida e da minha formação.

Ao meu orientador, Professor Doutor Mário Ventim Neves, pelos conselhos, pelas dúvidas tiradas, pelos ensinamentos e pela oportunidade de realizar este trabalho.

A todos os meus amigos e colegas pela amizade, aos tempos passados de forma a chegar a este momento. Um especial obrigado aos amigos e colegas de doutoramento Pedro Arsénio, Nuno Amaro, Nuno Vilhena pelas ideias ajudas e pelo companheirismo e também a Debs Sandão e Abreu Liliano.

Ao professor Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira pela ajuda e pelos conselhos.

Um especial obrigado à Anette Sousa Veiga pelos incentivos.

Resumo

Nesta dissertação é desenvolvido um dispositivo com o objetivo de obter as curvas que caracterizam um painel fotovoltaico, os vários parâmetros associados, bem como conseguir que o painel solar funcione sempre no ponto de máxima potência. É proposto um método que incorpora o desenvolvimento de um circuito eletrônico de baixo custo capaz de obter a curva característica I-V de painéis fotovoltaicos e ao mesmo tempo trabalhar no ponto de máxima potência.

É apresentada uma revisão bibliográfica, com uma contextualização histórica e um estudo teórico das características dos painéis fotovoltaicos, a sua estrutura, as curvas associadas e também a influência dos efeitos ambientais como a temperatura e da radiação. Também é apresentado um estudo sobre alguns dos conversores DC/DC bem como os algoritmos de procura do ponto de máxima potência.

De acordo com os estudos teóricos realizados é desenvolvido um protótipo que engloba um conversor redutor, um microcontrolador, sensor de corrente e de tensão de modo a alcançar os objetivos. São realizados ensaios relacionados com a curva característica I-V e os parâmetros associados, analisando os resultados e as curvas obtidas.

Posteriormente foram realizados ensaios relacionados com a procura do ponto de máxima potência comparando os dados obtidos com os do fornecedor do painel fotovoltaico.

Palavras Chave: Painel Fotovoltaico, Procura do Ponto de Máxima Potência, Conversores DC/DC, Curva I-V.

Abstract

In this thesis a device is developed in order to get the curves that characterizes a photovoltaic panel, the various associated parameters, and make sure that the solar panel always works at the maximum power point. A method is proposed which includes the development of a low-cost electronic circuit able to obtain the I-V curve of photovoltaic panels, and at the same time works at maximum power point.

A review presented with a historical context and a theoretical study of the characteristics of photovoltaic panels, the structure, the associated curves and also the influence of environmental effects such as temperature and radiance. It is also presented a study of some of DC/DC converters as well as the maximum power point tracking algorithms.

Taking into account the theoretical studies, a prototype is developed which is composed by a Buck converter, a microcontroller, current sensor and voltage sensor in order to achieve the objectives. Tests related to the I-V curve and the associated parameters are conducted, the obtained results are analysed regarding the parameters and the curve shape.

Further tests were carried out, related to the maximum power point tracking, by comparing the data obtained with of the supplier.

Keywords: Photovoltaic Panel, Maximum Power Point Tracking, DC/DC converters, I-V Curve.

Abreviaturas e Símbolos

A *Ampere*

DC *Corrente continua*

I_s [**I_s**] *Corrente inversa de saturação*

I *Intensidade de corrente*

I MPP [**I_{MPP}**] *Corrente no ponto de máxima potência*

I_{sc} [**I_{sc}**] *Corrente de curto-circuito*

I_{in} [**I_{in}**] *Corrente de entrada*

I_{out} [**I_{out}**] *Corrente de saída*

k *Constante de Boltzmann*

MPPT *Seguidor do ponto de máxima potência*

MPP *Ponto de potência máxima*

N_s [**N_s**] *Número de células em série*

N_p [**N_p**] *Número de células em paralelo*

n *Constante de idealidade*

P MPP [**P_{MPP}**] *Potência máxima*

PWM *Modulação de largura de impulsos*

q *Carga do eletrão*

R *Resistência*

Ts $[T_s]$ *Período total*

Ton $[T_{on}]$ *Período de condução*

Toff $[T_{off}]$ *Período de repouso*

V *Tensão elétrica*

T *Temperatura absoluta*

V MPP $[V_{MPP}]$ *Tensão no ponto de máxima potência*

Voc $[V_{oc}]$ *Tensão em vazio*

Vin $[V_{in}]$ *Tensão de entrada*

Vout $[V_{out}]$ *Tensão de saída*

δ *Ciclo de Serviço ou Duty Cycle*

DC/DC *Corrente contínua para corrente contínua*

DC/DC *Corrente contínua para corrente contínua*

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Abreviaturas e Símbolos	ix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento da dissertação	1
1.2 Objetivo da dissertação	1
1.3 Estrutura da dissertação	2
1.4 Contribuições originais	2
2 Energia fotovoltaica-Revisão Bibliográfica	5
2.1 Contexto Histórico	5
2.2 Característica dos painéis fotovoltaicos	7
2.2.1 Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica	9
2.2.2 Curva I-V de um painel fotovoltaica	10
2.2.3 Efeitos ambientais	12
2.3 Conversores DC/DC	14
2.3.1 Conversor Redutor	16
2.3.2 Conversor Ampliador	19
2.3.3 Conversor Redutor/Ampliador	22
2.4 Algoritmos de Procura do Ponto de Máxima Potencia - MPPT	25
2.4.1 Técnica Perturba e Observa(P&O)	25
2.4.2 Condutância incremental	27
2.4.3 Tensão Constante	29
3 Desenvolvimento Prático	31
3.1 Dimensionamento do conversor redutor	32
3.2 Implementação do controlador MPPT	39
3.2.1 Arduíno	39

3.2.2	Algoritmo implementado e programação	41
3.3	Ensaaios e resultados	46
3.4	Custos do protótipo	54
4	Conclusões e trabalhos futuros	55
4.1	Trabalhos futuros	56
	Apêndices	63
A	Código do Arduino	65

Lista de Figuras

2.1	Constituição típica de uma célula fotovoltaica	7
2.2	Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica([1])	9
2.3	Curva característica I-V de uma painel fotovoltaico([2])	11
2.4	Curvas característica I-V P-V de uma painel fotovoltaico([3])	12
2.5	Curva característica P-V em função da temperatura([4])	13
2.6	Curva característica P-V em função da temperatura e radiância([2])	13
2.7	Implementação de MPPT usando sensores de corrente e tensão([5])	14
2.8	Conversor Step-down ou Buck([6])	16
2.9	Conversor Buck com transistor a conduzir([6])	16
2.10	Conversor Buck com transistor ao corte([6])	17
2.11	Formas de onda do conversor Buck no modo contínuo([6])	18
2.12	Conversor Step-up ou Boost([6])	19
2.13	Conversor Boost com transistor a conduzir([6])	19
2.14	Conversor Boost com transistor ao corte([6])	20
2.15	Formas de onda do conversor Boost no modo contínuo([6])	21
2.16	Conversor Buck-Boost([6])	22
2.17	Conversor Buck-Boost com transistor em condução([6])	22
2.18	Conversor Buck-Boost com transistor ao corte([6])	23
2.19	Conversor Buck-Boost com transistor ao corte([6])	24
2.20	Fluxograma da Técnica Perturbar e Observar	26
2.21	Mau funcionamento do $P\&O$ devido ao aumento brusco de radiância ([7])	27
2.22	Curva da Potência de saída e sua derivada ([5])	28
2.23	Fluxograma do método Condutância incremental ([8])	29
2.24	Fluxograma do método de Tensão Constante ([9])	30
3.1	Sistema MPPT com o uso de sensores([5])	32
3.2	Conversor Step-down ou Buck([6])	32
3.3	Circuito do conversor redutor ideal - Dimensionamento 1	34
3.4	Tensão e corrente de saída do conversor redutor ideal - Dimensionamento 1	35
3.5	Tensão de saída do conversor redutor ideal - Dimensionamento 1	35
3.6	Corrente de saída do conversor redutor ideal - Dimensionamento 1	36

3.7	Circuito do redutor não ideal - Dimensionamento 3	37
3.8	Tensão de saída do conversor redutor - Dimensionamento 2	38
3.9	Esquema elétrico do sistema MPPT	38
3.10	Conversor redutor	39
3.11	Arduíno	40
3.12	Curva característica I-V de uma painel fotovoltaico([2])	41
3.13	Fluxograma do procedimento Tirar_Car	42
3.14	Fluxograma do Modo Ligado	43
3.15	Fluxograma do Modo MPPT	44
3.16	Fluxograma do Procedimento Painel_Mppt	44
3.17	Fluxograma do Programa	45
3.18	Ensaio do protótipo	46
3.19	Curva característica P-V I-V - Primeiros ensaios	47
3.20	Saída do MPPT- Primeiros ensaios	48
3.21	Curva característica I-V P-V - Resistência de carga nula	49
3.22	Relação entre ciclo de serviço e Potência	50
3.23	Curva característica I-V - Ensaios Finais	51
3.24	Curva característica P-V - Ensaios Finais	51
3.25	Saída do MPPT- Ensaios Finais	52
3.26	Saída do MPPT- Ensaios Finais Radar	52
3.27	Curvas Características - Fornecedor	53
3.28	Saída do MPPT - Variação de radiância	54

Lista de Tabelas

3.1	Característica do painel fotovoltaico KC40-KYOCERA	31
3.2	parâmetros para o dimensionamento do conversor redutor	33
3.3	Característica do painel fotovoltaico KC40-KYOCERA.	46
3.4	Parâmetros da característica do painel- Primeiros ensaios	48
3.5	Parâmetros da característica do painel- Ensaios para varias resistências . .	48
3.6	Parâmetros da característica do painel- Ensaios com saída em curto-circuito	49
3.7	Parâmetros da característica do painel- Ensaios Finais	50
3.8	Comparação fornecedor protótipo	53
3.9	Custos do Protótipo	54

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento da dissertação

Nos últimos séculos observou-se uma grande evolução tecnológica associado às fontes de energias fósseis, como o carvão e posteriormente à utilização do petróleo e do gás natural, sendo estes combustíveis os mais utilizados atualmente. Devido ao facto de serem fontes de energias finitas e poluentes tem-se verificado um grande incentivo ao desenvolvimento e investigação de outras fontes de energias, renováveis e não poluentes, como é o caso da energia solar fotovoltaica. Esta investigação passa por exemplo por desenvolver novas matérias, melhorar a eficiência energética e reduzir os custos. Desta forma, esta dissertação aborda estes dois últimos pontos, eficiência energética fazendo que se consiga obter o máximo de potência de um painel a um custo reduzido comparado aos dispositivos encontrados no mercado.

1.2 Objetivo da dissertação

O objetivo desta dissertação é a caracterização elétrica automática e procura do ponto de máxima potência. Pretende-se projetar e construir um aparelho baseado numa plataforma de desenvolvimento com microprocessador que execute automaticamente as operações de caracterização e efetue os cálculos que extraem os valores dos parâmetros. Tem-se como objetivo utilizar uma carga comutada, constituída por um conversor DC/DC, corrente contínua para corrente contínua, prevendo a utilização de IGBT, “Insulated Gate

Bipolar Transistor”. O aparelho deverá controlar a frequência de comutação e o ciclo de serviço ou “duty cycle” necessário para a obtenção de cada ponto da característica. Os resultados das medidas deverão ser comparadas com os dados dos fabricantes, simulações ou medições feitas noutros contextos.

O aparelho deverá também implementar uma técnica de busca do ponto de máxima potência (Maximum Power Point Tracking, MPPT).

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos, composto por uma pequena introdução aos aspetos desenvolvidos na dissertação e mais três capítulos com os conceitos necessários e as metodologias utilizadas para atingir os objetivos propostos pela dissertação. No segundo capítulo são descritos os marcos históricos que ajudaram na evolução da energia fotovoltaica, as características dos painéis fotovoltaicos, as curvas associadas. Posteriormente é descrito alguns dos vários conversores DC/DC que podem ser utilizados num circuito eletrónico para que um painel trabalhe no ponto de máxima potência e um estudo sobre os vários algoritmos de procura do ponto de máxima potência, MPPT. No terceiro capítulo é realizado o desenvolvimento prático, com o dimensionamento de um conversor Buck para o painel fotovoltaico utilizado no estudo, uma explicação detalhada do algoritmo desenvolvido para a procura do ponto de máxima potência e do microcontrolador utilizado. Posteriormente é apresentado o dispositivo construído, os vários ensaios realizados, os resultados obtidos e os custos associados ao protótipo. No quarto capítulo é apresentado as conclusões do trabalho realizado nos capítulos anteriores e algumas sugestões para trabalhos futuros.

1.4 Contribuições originais

Este trabalho pretende apresentar a conceção, projeto, ensaio e utilização de um aparelho de baixo custo capaz de fazer automaticamente a obtenção das características de um painel fotovoltaico e a identificação do ponto de máxima potência. O dispositivo é baseado na plataforma Arduino, e tendo quanto se saiba esta é uma solução técnica

original.

Capítulo 2

Energia fotovoltaica-Revisão Bibliográfica

2.1 Contexto Histórico

As energias renováveis constituem uma das mais antigas fontes de energia usadas pela humanidade. Durante a nossa evolução o ser humano sempre tentou desenvolver tecnologias de forma a conseguir realizar trabalho, quer seja usando a força de animais, do homem ou fontes de energia provenientes da natureza como por exemplo a energia eólica e hídrica.

Com a evolução tecnológica dos últimos séculos, passou-se a utilizar combustível fóssil, primeiramente o carvão de forma a gerar energia, constituindo um marco importante para o processo da revolução industrial, que se iniciou em meados do século XVIII.

Posteriormente, apareceram outros combustíveis fósseis como o petróleo e depois o gás natural que tinham preços relativamente baixos e quantidades abundantes. Hoje em dia esses combustíveis geram pelo menos três quartos da energia consumida no planeta [10].

A partir das décadas de 70 e 80 do século vinte em que se verificou crises na área da extração petrolífera houve um aumento do preço desses combustíveis e a mudança de pensamento nomeadamente em relação à sua natureza finita. Também houve uma maior preocupação com as poluições ambientais e nas últimas décadas tem-se verificado um maior

incentivo ao uso de energias renováveis dentro desta a energia solar fotovoltaica. Tem-se verificado um grande investimento na tecnologia fotovoltaica onde são desenvolvidos novos materiais que tem uma melhor eficiência energética e uma redução dos custos de implementação desses dispositivos[10].

Mas a história do efeito fotovoltaico começou muito antes quando em 1839 Edmond Becquerel de só 19 anos verificou, enquanto fazia uma experiência, que placas metálicas de platina ou prata mergulhadas em eletrólito davam origem ao efeito fotovoltaico quando exposta à luz[11]. De seguida os marcos mais importantes da história da célula fotovoltaica[12][13]:

1873 - Willoughby Smith descobriu o efeito fotovoltaico ou fotocondutividade no selênio.

1877 - William Grylls Adams e Richard Evans Day construíram a primeira célula solar com uma eficiência de 0,5%.

1883 - Charles Frits construiu células solares constituído por uma camada de selênio entre finas camadas de ouro e outro metal conseguindo uma eficiência de 1% [14].

1905 - Foi publicado o trabalho de Albert Einstein que explica o efeito fotovoltaico.

1954 - É desenvolvida a primeira célula fotovoltaica de silício por Calvin Fuller atingindo uma eficiência de 6% graças ao desenvolvimento de um processo que introduzia impurezas em cristais de silício de forma a controlar as suas propriedades elétricas.

1958 - Primeiros satélites utilizando células fotovoltaicas.

1973 - A crise do petróleo faz com que haja um forte investimento na investigação em células solares de forma a reduzir o custo de produção.

1976 - Fabricado primeira célula fotovoltaica de silício amorfo.

Nas décadas seguintes deu-se continuação da investigação sobre células solares com vista a redução do custo de fabrico e desenvolvimento de novos materiais mais fáceis de fabricar.

2.2 Característica dos painéis fotovoltaicos

Um painel fotovoltaico é um dispositivo que converte energia solar em elétrica, constituído por pequenas células fotovoltaicas. Um material ou aparelho diz-se fotovoltaico quando consiga que fotões com comprimento de onda suficientemente pequeno e energia suficiente elevada façam com que os eletrões se libertem dos átomos desse material e produzindo corrente e tensão efetuando o efeito fotovoltaico[10][15]. Tendo em conta a figura 2.1 as células fotovoltaicas tipicamente são constituídas por várias camadas como:

- Grelha e contactos frontais.
- Película anti-reflexo.
- Camada tipo n.
- Camada tipo p.
- Contacto traseiro(ôhmico).

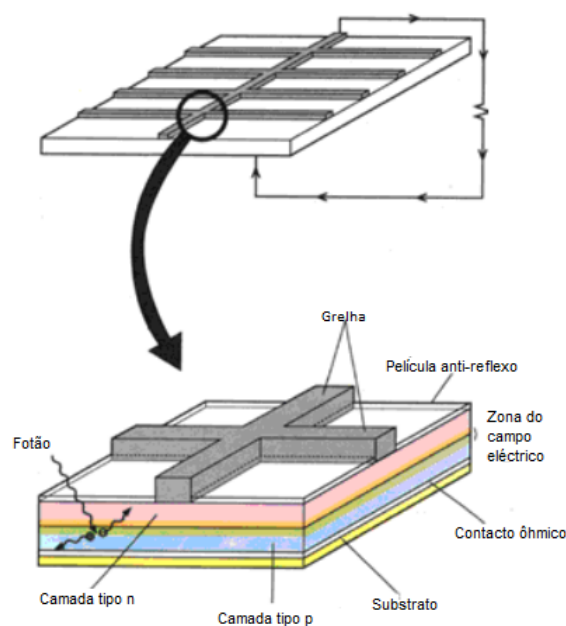


Figura 2.1: Constituição típica de uma célula fotovoltaica ([16])

Entre os materiais mais utilizados atualmente para a construção de um painel fotovoltaico encontra-se o silício com a ajuda de outras substâncias dopantes de modo a

que o efeito fotovoltaico se realize. No caso do silício, os átomos na sua camada mais externa, banda de valência, dispõem de quatro elétrons e ao construir uma rede cristalina os átomos se organizam formando quatro ligações covalentes com os átomos vizinhos partilhando cada um dos quatro elétrons disponíveis na banda de valência aumentando o número de elétrons para oito tendo em conta cada átomo[16][15].

De forma a modificar as propriedades elétricas do silício e conseguir criar a diferença de potencial são criadas dois tipos de camadas: uma com excesso de cargas positivas e outro com excesso de cargas negativas denominadas camada de tipo p e tipo n respetivamente.

Tendo em conta que a banda de valência do silício dispõe de quatro elétrons por átomo para criar a camada de tipo p utilizam-se materiais que dispõem de três elétrons na banda de valência. Desta forma, criam-se três ligações com um par de elétrons e uma ligação só com um elétron. Esta lacuna é vista como uma carga positiva. Para se criar a camada de tipo n normalmente usa-se o fósforo uma vez que dispõe de cinco elétrons na sua banda de valência. Criando desta forma quatro ligações covalentes com átomos do silício e um elétron livre. A zona onde estas duas camadas se encontram tem o nome de junção p-n[16].

Tendo em conta a diferença potencial entre as duas camadas do painel fotovoltaico, aparece um campo elétrico na junção p-n. Os elétrons que passarem da banda de valência para a banda de condução serão enviado para o terminal negativo e as lacunas para o terminal positivo. Desta forma, por ligações externas entre os terminais, positivo e negativo, utilizando um circuito com uma carga, circulará corrente elétrica[16][15].

Uma célula fotovoltaica produz uma potência reduzida dependendo do tipo de substância usada na sua criação e a tecnologia. Deste modo várias células são colocadas em série no que se dá o nome de módulo e vários módulos são dispostos em paralelo, série ou misto de forma a aumentar o valor da potência tendo em conta a tensão e a corrente do painel constituído pelos vários módulos[15].

2.2.1 Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica

A célula solar é o elemento responsável pela transformação dos fotões diretamente em energia elétrica e é a unidade básica de um módulo fotovoltaico. O modelo é composto por uma fonte de corrente, um díodo e duas resistências, pois a característica I-V da célula fotovoltaica tem uma caraterística exponencial, idêntica à do díodo. A corrente à saída da fonte depende principalmente da temperatura da célula e da radiação solar. Para representar a queda de tensão no circuito até aos contactos exteriores que se observa nas células fotovoltaicas utiliza-se a resistência em série R_s . Da mesma forma existe corrente de fuga que são representadas pela resistência em paralelo R_p [1] [17].

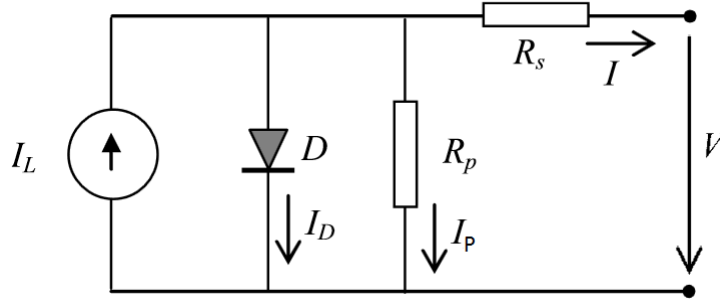


Figura 2.2: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica([1])

A equação da corrente de saída da célula fotovoltaica, I será igual a:

$$I = I_L - I_D - I_p \quad (2.1)$$

A corrente que atravessa o díodo tem uma característica não linear e depende da corrente inversa de saturação, I_s , da temperatura do painel e das correntes fornecidas à carga como se pode ver pela equação 2.2.

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Onde:

- " I_s ": Corrente inversa de saturação do díodo(A).
- " q ": Carga do eletrão ($1,6 \times 10^{-19}$ C).

- "k": Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K).
- "T": Temperatura absoluta da célula.
- "n": Constante de idealidade do díodo.

A constante n depende do material e da estrutura física da célula fotovoltaica. Tendo em conta a equação 2.1, substituindo a equação referente a I_D obtém-se:

$$I = I_L - I_s \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.3)$$

Neste caso a equação é referente a uma única célula fotovoltaica. Tendo em conta que um painel fotovoltaico é constituído por varias células em série e em paralelo a equação equivalente é a seguinte:

$$I = N_P I_L - N_P I_s \left(e^{\frac{q(V+IR_s \frac{N_S}{N_P})}{N_S nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s \frac{N_S}{N_P}}{\frac{N_P}{N_S} R_P} \quad (2.4)$$

Onde N_s é o número de células fotovoltaicas em série e N_p o número de células fotovoltaicas em paralelo.

2.2.2 Curva I-V de um painel fotovoltaica

A capacidade de conversão de energia de um painel solar é descrita pela curva corrente tensão para uma dada condição de radiação solar e temperatura. Se mantiverem as mesmas condições de temperatura e radiação constantes a curva representa a combinação de valores de corrente e de tensão para o qual o painel poderá operar [3].

De forma a entender as características da curva, é definida numa primeira fase, por convenção de sinais que a corrente é positiva sempre que a célula fotovoltaica gera a partir da energia solar e aparece uma tensão positiva aplicada aos terminais da célula. Tendo uma resistência variável R aos terminais da célula fotovoltaica, o seu ponto de operação é definido pela intersecção da característica corrente tensão do painel e da respetiva carga[2].

Considerando uma carga resistiva, a característica é dada por uma linha reta com

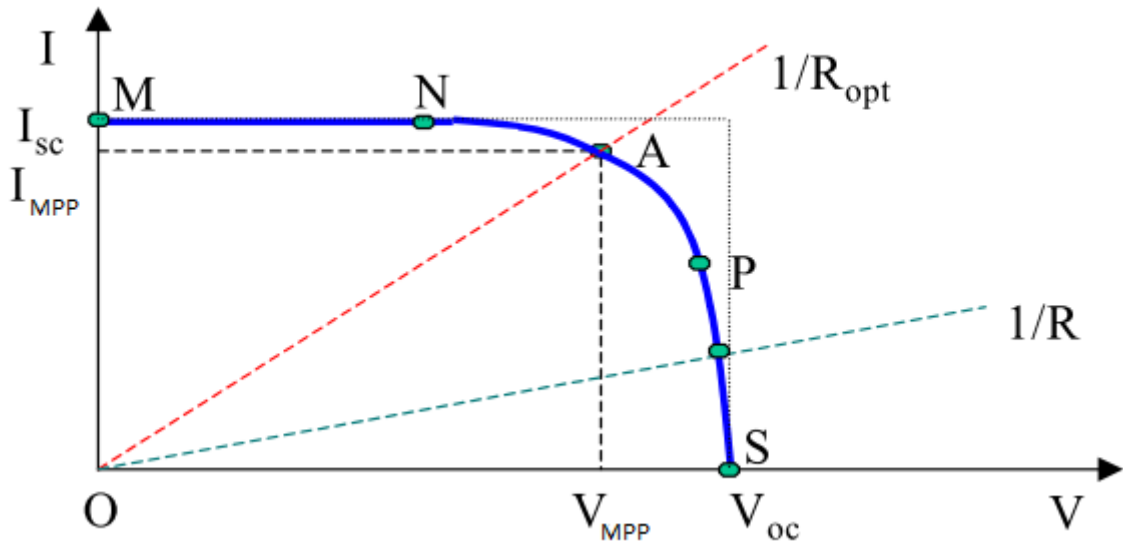


Figura 2.3: Curva característica I-V de uma painel fotovoltaico([2])

declive $\frac{I}{V} = \frac{1}{R}$. Neste caso, a potência fornecida à carga depende inteiramente da carga resistiva. Tendo em conta que o ponto de funcionamento varia inversamente com o valor da resistência, de acordo com a figura 2.3, para uma carga resistiva pequena o ponto de funcionamento da célula estará entre o ponto M e o ponto N. Neste caso o painel fotovoltaico comportar-se-á como uma fonte de corrente constante e quase igual à do curto-circuito.

Por outro lado se a carga resistiva for grande o ponto de funcionamento estará entre o ponto P e o ponto S. Neste caso o painel fotovoltaico comportar-se-á como uma fonte de tensão constante quase igual à tensão em circuito aberto. Há três pontos de operação muito importantes representados na figura que são fornecidos como parâmetros de um painel fotovoltaico, nomeadamente ponto M caracterizado pela corrente de curto-circuito I_{sc} , ponto S caracterizado pela tensão de vazio ou circuito aberto V_{oc} e o ponto A denominado de ponto de máxima potência, MPP [2].

A corrente de curto-circuito (I_{sc}) representa a corrente máxima que o painel consegue gerar quando a tensão aos seus terminais é zero e depende do nível de insolação. A tensão de vazio (V_{oc}) representa o valor de tensão obtido aos seus terminais de um painel

fotovoltaico quando este se encontra em vazio, ou seja, estando a corrente aos terminais do painel nula. O ponto de máxima potência, MPP, corresponde ao ponto em que a potência P_{MPP} fornecida a carga é máxima sendo este o ponto ótimo do painel.

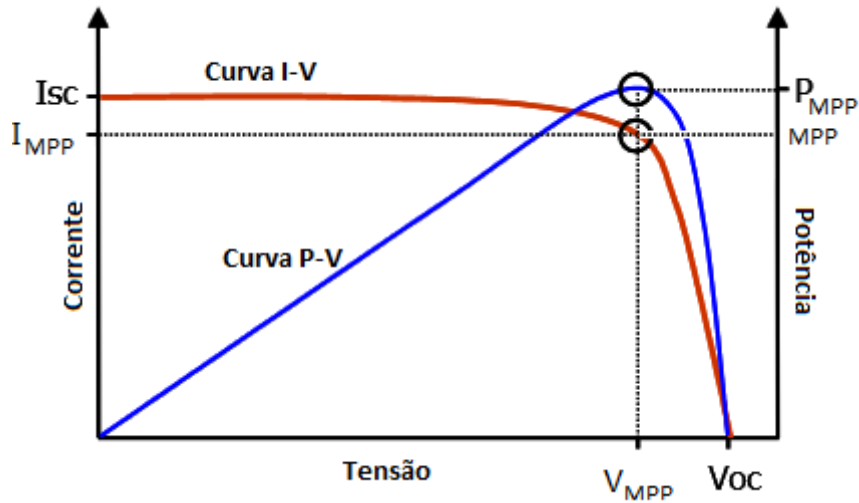


Figura 2.4: Curvas característica I-V P-V de uma painel fotovoltaico([3])

2.2.3 Efeitos ambientais

A tensão em vazio de um painel fotovoltaico varia com a temperatura uma vez que com um aumento desta há uma diminuição do valor da tensão e consequentemente a potência do painel diminui, e perdendo eficiência como se pode verificar na figura 2.5. A corrente de curto-circuito aumenta proporcionalmente com a temperatura da célula mas verificando apenas uma ligeira alteração [2][4].

Com o aumento da temperatura há uma diminuição do valor da tensão de vazio de um painel solar fotovoltaico, consequentemente há uma diminuição da potência obtida, como se pode observar na figura 2.5. Em relação á corrente de curto-circuito observa-se um ligeiro aumento com o aumento da temperatura como se pode verificar na figura 2.6.

Tendo em conta a figura 2.6 a tensão de vazio aumenta logaritmicamente com a radiância solar enquanto a corrente de curto-circuito é proporcional à radiância. Em relação ao ponto de funcionamento de potência máxima, como as condições ambientais

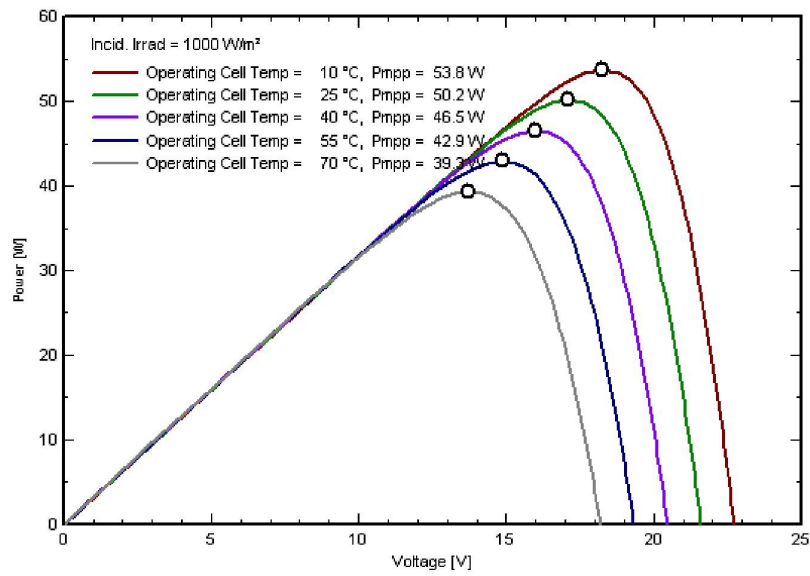


Figura 2.5: Curva característica P-V em função da temperatura([4])

influenciam os valores de corrente e de tensão, verifica-se que com altos valores de radiação este ponto move-se para cima assim aumentando de valor.

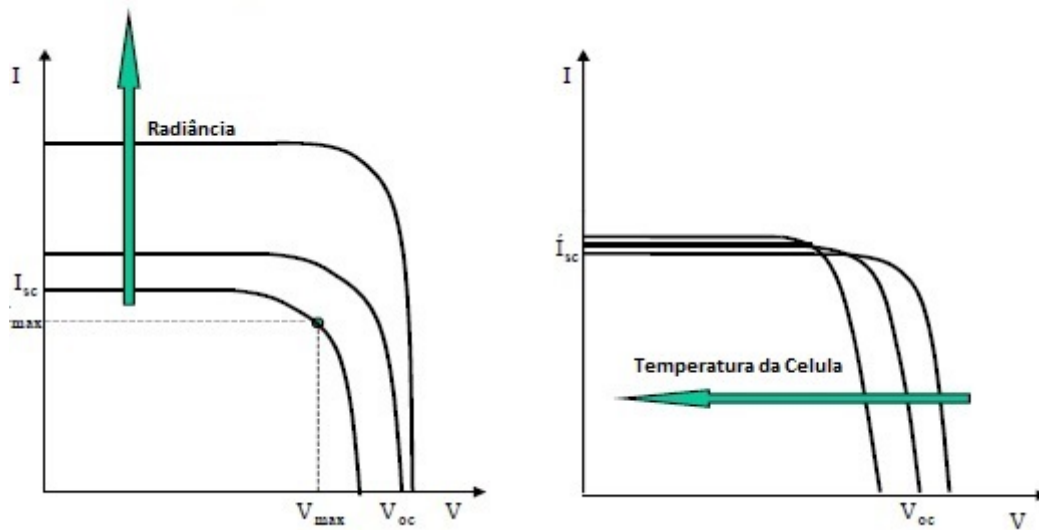


Figura 2.6: Curva característica P-V em função da temperatura e radiação([2])

2.3 Conversores DC/DC

Um painel fotovoltaico tem uma característica corrente-tensão não linear e o ponto de máxima potência varia com a radiação e com a temperatura podendo estes variar aleatoriamente. Com a carga ligada diretamente ao painel raramente se consegue trabalhar no ponto de máxima potência. Por isso são utilizadas dispositivos chamados de MPPT entre o painel fotovoltaico e a carga para que o ponto de funcionamento sobre a curva característica do painel seja sempre coincidente com o ponto de máxima potência. Este dispositivo é normalmente constituído por um conversor DC/DC entre a carga e o painel controlado por um algoritmo que recebendo os valores de corrente e tensão entre outros calcula o melhor ciclo de serviço (“duty cycle”) de forma a maximizar a potência de saída [18][5].

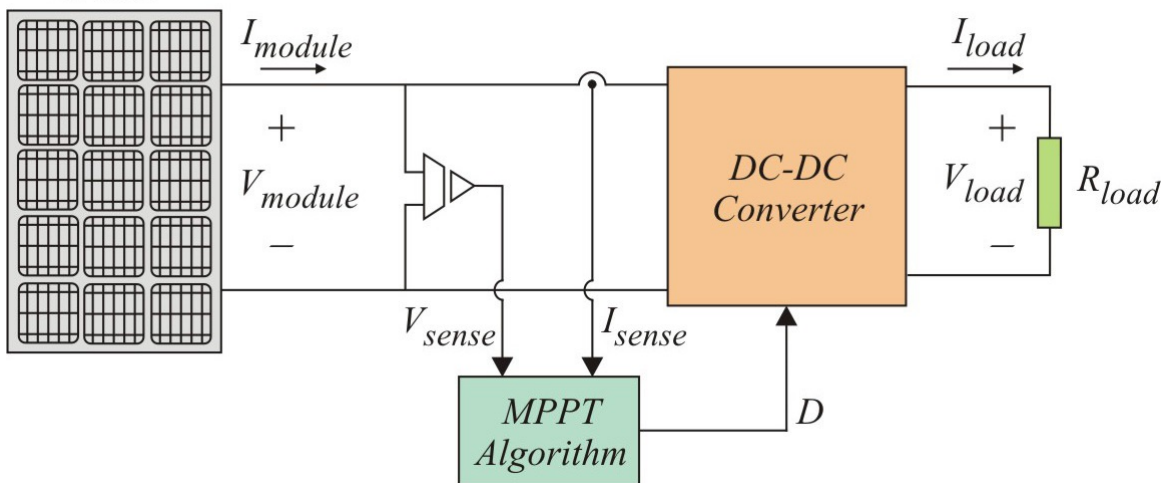


Figura 2.7: Implementação de MPPT usando sensores de corrente e tensão([5])

Os conversores DC/DC são dispositivos utilizados para converter corrente e tensão contínua com determinados valores para outros valores. Existem dois grupos de conversores, os isolados e os não isolados sendo a principal diferença o uso de transformadores de isolamento elétrico no primeiro e o não uso no segundo. Este estudo abordará o caso dos conversores não isolados, que são normalmente constituídos por díodos e elementos passivos como bobinas, resistências e condensadores [19]. São sistemas comutados que controlam o valor médio da tensão na saída tendo em conta a tensão de entrada por va-

riação dos intervalos de tempo de ligação de um transístor [19][20]. Os conversores mais básicos são os seguintes:

- Conversor redutor (Step-down ou Buck).
- Conversor ampliador (Step-up ou Boost).
- Conversor redutor/ampliador (Step-down/Step-up ou Buck-Boost).

Estes podem trabalhar em três modos de funcionamento distintos, o modo contínuo ou regime não lacunar, o modo descontínuo ou regime lacunar e o modo crítico. Caso a corrente na bobina nunca seja nula o modo de funcionamento será o contínuo. Caso a corrente atinja o valor nulo no fim do período de tempo da comutação o modo de funcionamento será o crítico, mas se a corrente atingir esse valor antes da comutação o modo será descontínuo.

2.3.1 Conversor Redutor

A função do conversor redutor é que a uma dada tensão média de entrada produza uma tensão média de saída menor. O modelo do conversor pode ser observado na figura 2.8. O conversor redutor é formado por um filtro passa-baixo formado por um condensador e uma bobina, onde o condensador tem a função de filtrar a tensão reduzindo o ruído na saída. A bobina reduz a ondulação da corrente de saída.

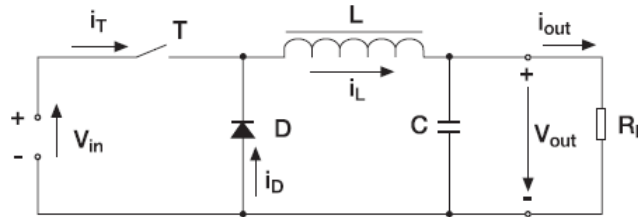


Figura 2.8: Conversor Step-down ou Buck([6])

Considerando o sistema ideal a tensão de saída será constante. Tendo em conta a figura 2.9, estando numa primeira fase o transístor T em condução, e conseqüentemente o díodo D estará ao corte pois se encontra com polaridade inversa, a corrente circula pela bobina L e pela carga R_L resultando um valor da tensão na bobina igual a diferença entre a entrada e a saída fazendo com que a corrente na bobina aumente.

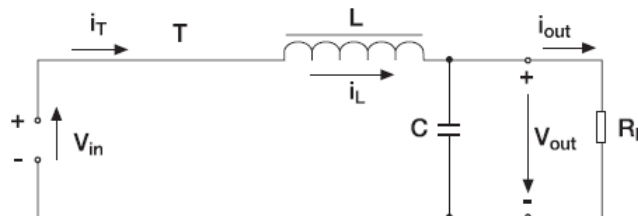


Figura 2.9: Conversor Buck com transístor a conduzir([6])

Numa segunda fase quando o transístor estiver ao corte, como se pode ver na figura 2.10 a energia guardada na bobina polarizará diretamente o díodo colocando este a conduzir fornecendo energia armazenada na bobina no tempo de condução à saída [19].

De referir que o valor médio de saída dos conversores DC/DC é controlado pela relação entre os períodos de tempo em que o transístor se encontra em condução e em corte utilizando um sinal “PWM”, Pulse-Width Modulation, à entrada do transístor com um valor

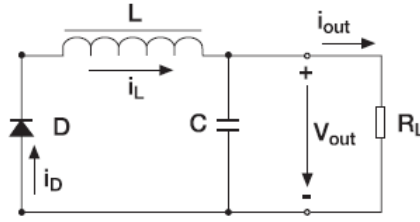


Figura 2.10: Conversor Buck com transístor ao corte([6])

de ciclo de serviço, δ . Sendo o ciclo de serviço a relação entre o período de condução(t_{on}) e o total(T_s). A função de transferência da tensão de saída media do conversor é dada por:

$$V_{out} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_0(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{on}} V_{in} dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} V_{in} = \delta V_{in} \quad (2.5)$$

onde

$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (2.6)$$

No modo contínuo ou não lacunar em que a corrente da bobina não se anula durante a comutação nas duas fases enunciadas anteriormente, na primeira fase o tensão da bobina será $V_L = V_{in} - V_{out}$ e na segunda fase a tensão na bobina será $V_L = V_{out}$. Tendo em conta que para o regime permanente a tensão da bobina para um período T_s tem que ser zero e analisando o circuito obtém-se a seguinte equação:

$$(V_{in} - V_{out}) t_{on} = V_{out} (T_s - t_{on}) \quad (2.7)$$

ou

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.8)$$

Assumindo que não há perdas no circuito, $P_{in} = P_{out}$ com $I_T = I_{in}$ então

$$V_{in} I_{in} = V_{out} I_{out} \quad (2.9)$$

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} \quad (2.10)$$

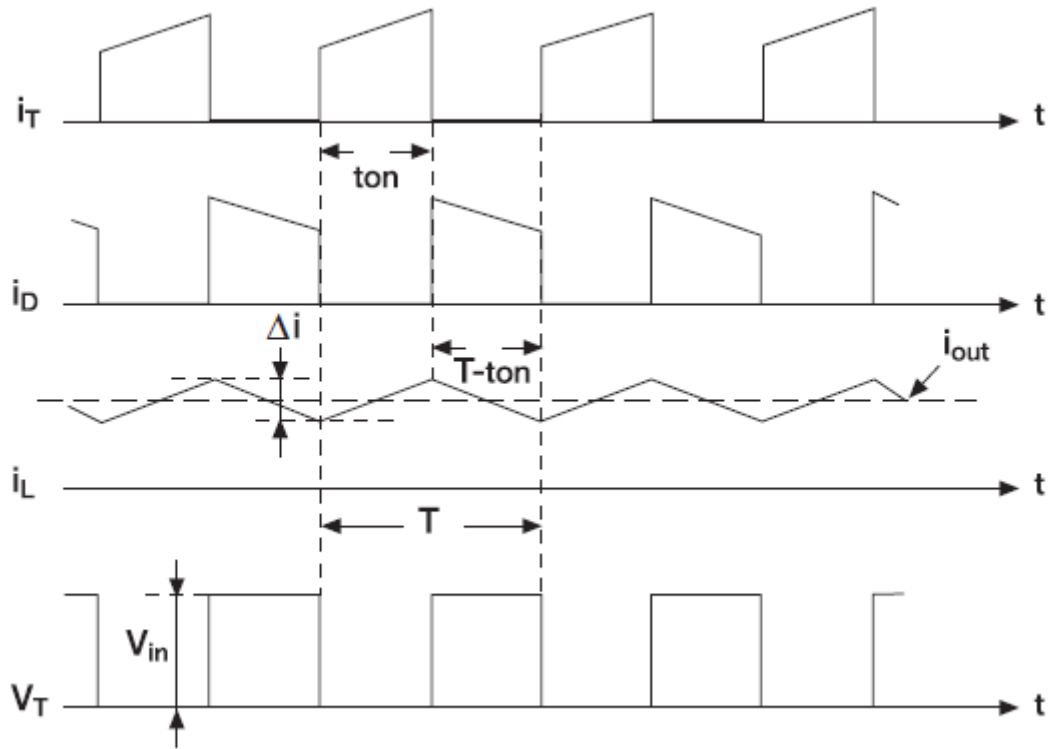


Figura 2.11: Formas de onda do conversor Buck no modo contínuo([6])

Como o tempo de condução é sempre menor ou igual que o tempo total o ciclo de serviço varia de 0 a 1 representando normalmente pelo seu valor em percentagem. Neste caso tendo em conta a equação 2.10 a tensão de saída será inferior ou igual à entrada. As formas de ondas deste conversor para o modo contínuo encontram-se representadas na figura 2.11.

2.3.2 Conversor Ampliador

A função do conversor ampliador é que a uma dada tensão média de entrada produza uma tensão média de saída maior. O seu funcionamento é caracterizado pelo armazenamento da energia no indutor e fornecimento da mesma à saída [19]. O modelo do conversor pode ser observado na figura 2.12.

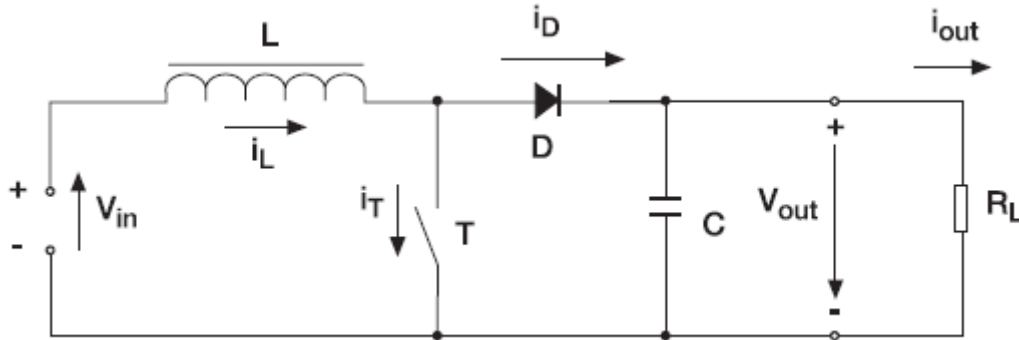


Figura 2.12: Conversor Step-up ou Boost([6])

Como se pode ver na figura 2.13 numa primeira fase estando o transistor a conduzir o diodo estará ao corte fazendo com que a entrada forneça energia à bobina aumentando o seu valor e que a saída fique isolada.

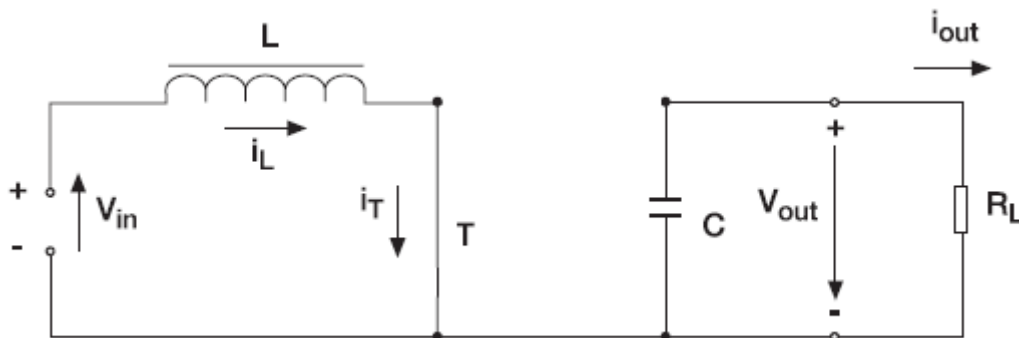


Figura 2.13: Conversor Boost com transistor a conduzir([6])

Numa segunda fase, quando o transistor estiver ao corte a energia armazenada na bobina será fornecida à saída bem como a da entrada como se pode verificar na figura 2.14. Logo neste caso a tensão de saída aumenta sendo superior ao da entrada.

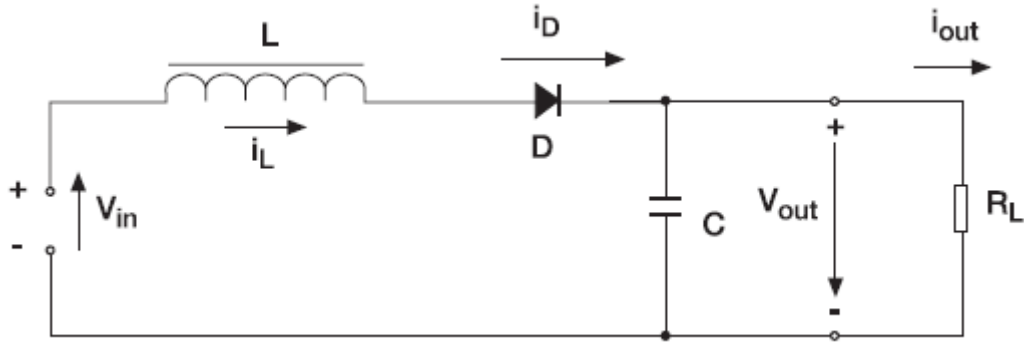


Figura 2.14: Conversor Boost com transistor ao corte([6])

Tendo em conta que no regime permanente o integral da tensão da bobina em ordem ao tempo ao longo de um período tem de ser zero teremos:

$$V_{in}t_{on} + (V_{in} - V_{out})t_{off} = 0 \quad (2.11)$$

Tendo em conta a equação 2.6 e resolvendo teremos

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1 - \delta} \quad (2.12)$$

Assumindo que não há perdas no circuito, $P_{in} = P_{out}$ então

$$V_{in}I_{in} = V_{out}I_{out} \quad (2.13)$$

e

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = (1 - \delta) \quad (2.14)$$

As formas de onda do conversor amplificador para o modo contínua encontram-se na figura 2.15

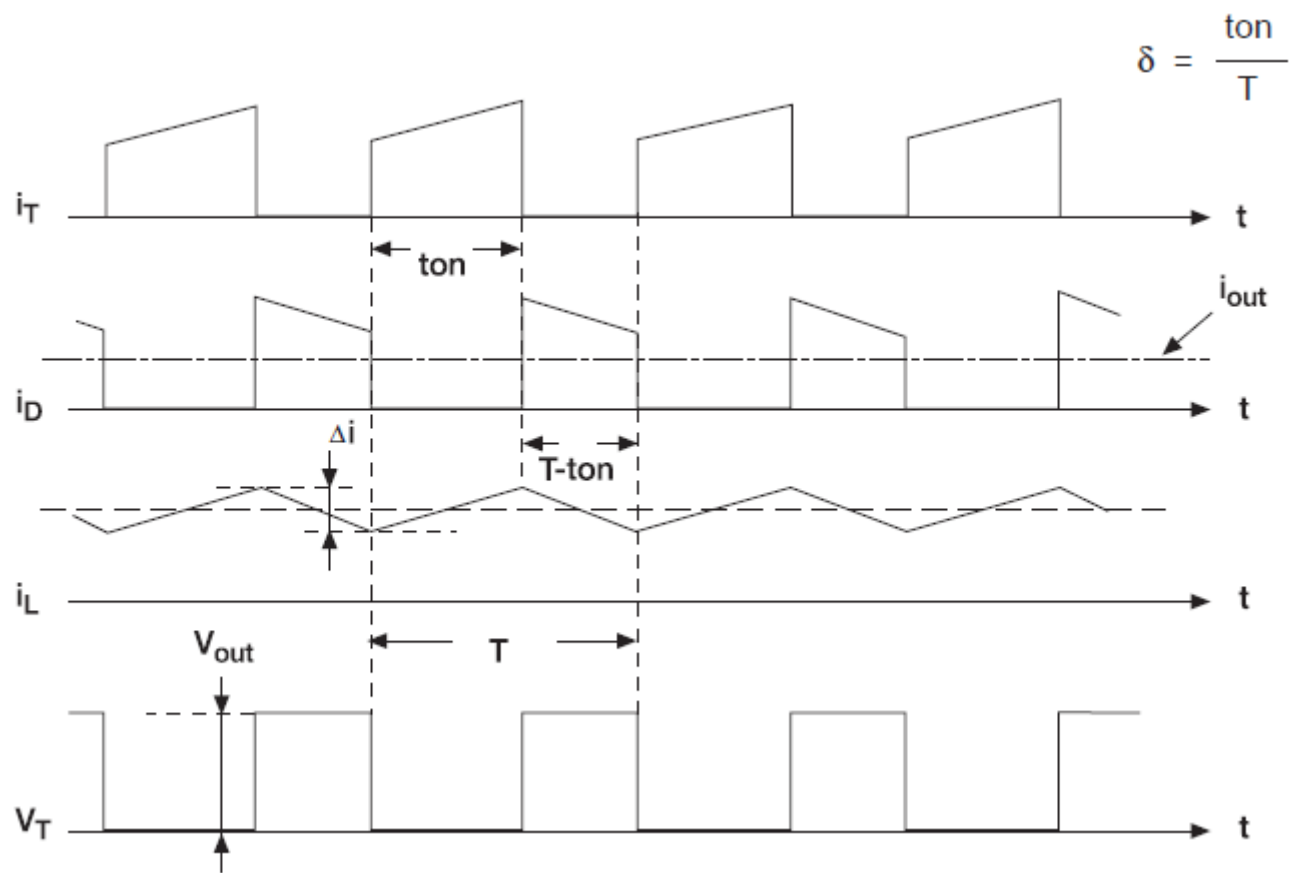


Figura 2.15: Formas de onda do conversor Boost no modo contínuo([6])

2.3.3 Conversor Redutor/Amplificador

O conversor redutor/amplificador como o nome indica se obtém da ligação em cascata dos conversores redutor e amplificador. Consequentemente pode gerar uma tensão de saída superior ou inferior ao da entrada de acordo com o ciclo de serviço da onda PWM que controla o transistor. De referir que a tensão de saída terá polaridade negativa em relação à entrada. O circuito do conversor é mostrado na figura 2.16

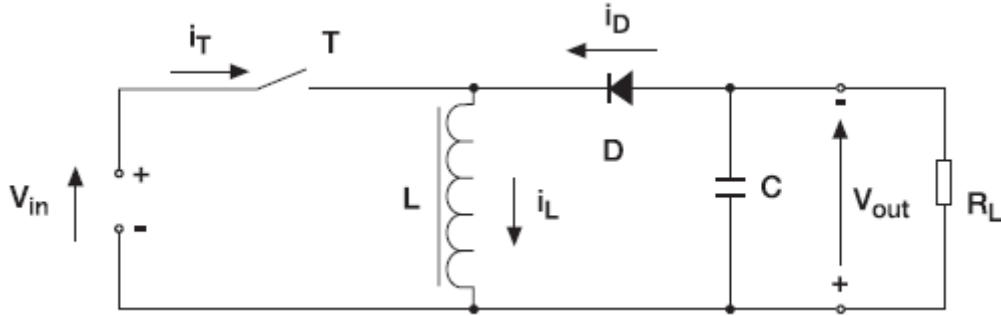


Figura 2.16: Conversor Buck-Boost([6])

A equação relacionada com o circuito tendo em conta as equações relativos ao conversor redutor (2.10) e ao Boost (2.12) no modo contínuo o ganho estático será:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\delta}{1 - \delta} \quad (2.15)$$

O seu funcionamento é também definido em duas etapas. Na primeira etapa, o transistor encontra-se em condução. Neste caso o diódo está ao corte pelo que a entrada fornece energia à bobina.

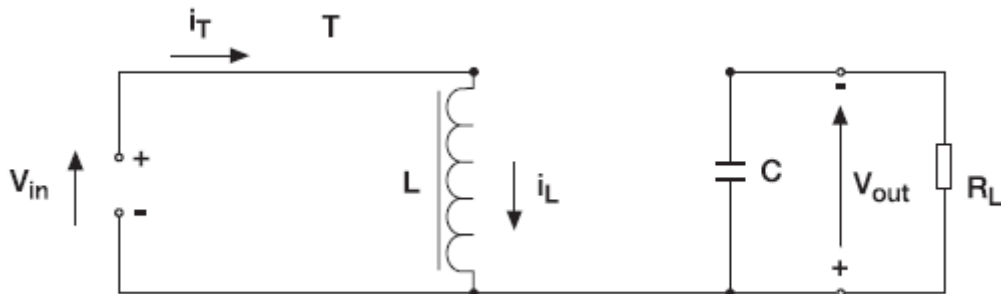


Figura 2.17: Conversor Buck-Boost com transistor em condução([6])

Numa segunda fase, com o transistor em corte, a entrada estará isolado e a ener-

gia armazenada no indutor será fornecida à saída. Considerando o regime permanente, assumindo o valor do condensador elevado, a tensão de saída será constante.

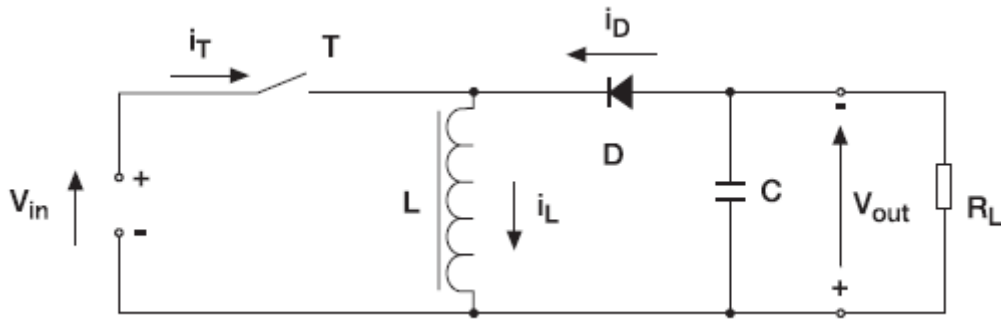


Figura 2.18: Conversor Buck-Boost com transistor ao corte([6])

Tendo em conta a equação 2.15 a tensão de saída pode ser maior, menor ou igual ao da entrada de acordo com o ciclo de serviço, sendo o valor máximo desta tensão quando o ciclo de serviço for de 50 %.

Assumindo que o circuito não tem perdas, $P_{in} = P_{out}$ então:

$$V_{in}I_{in} = V_{out}I_{out} \quad (2.16)$$

logo

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1 - \delta}{\delta} \quad (2.17)$$

As formas de ondas dos sinais do conversor redutor/amplificador para o modo não lacunar são apresentadas na figura 2.19.

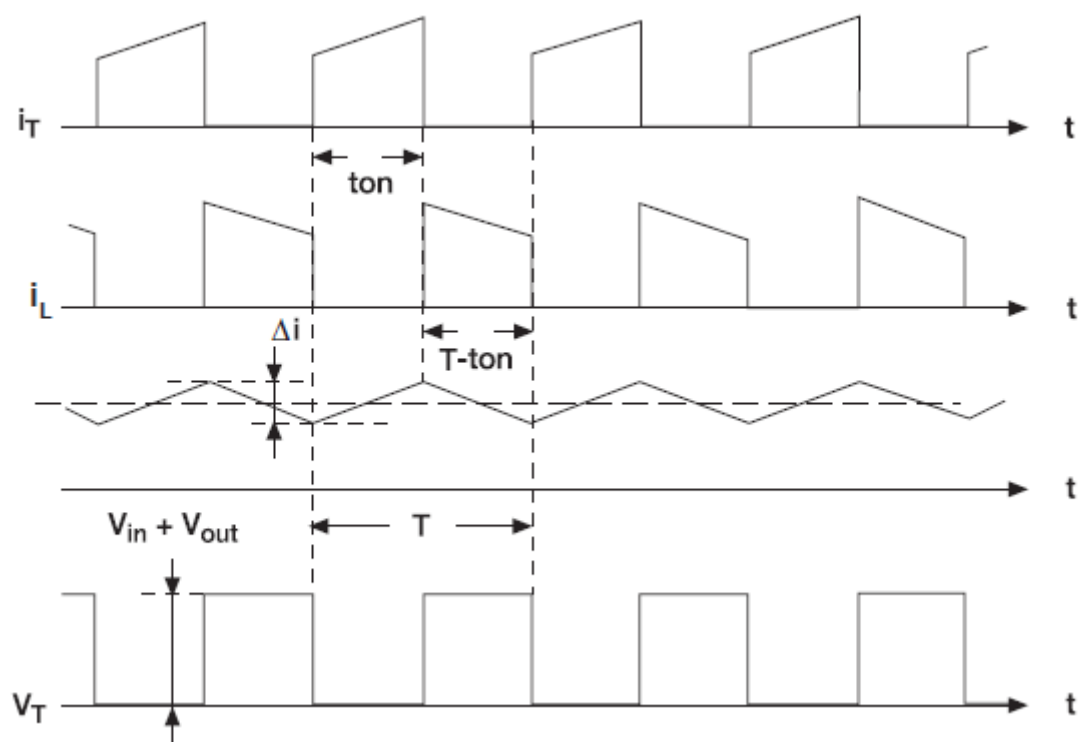


Figura 2.19: Conversor Buck-Boost com transistor ao corte([6])

2.4 Algoritmos de Procura do Ponto de Máxima Potencia - MPPT

O objetivo dos algoritmos de procura do ponto de máxima potência é de fazer com que o painel trabalhe na sua capacidade máxima independentemente dos vários problemas introduzidos pelas agentes externos como as condições ambientais. Os algoritmos mais utilizados são os seguintes:

- Técnica Perturbar e Observar.
- Condutância incremental.
- Tensão Constante.

2.4.1 Técnica Perturba e Observa(P&O)

A técnica perturba e observa (*P&O*) é uma das técnicas de procura do ponto de máxima potência mais comum e simples devido ao facto de ser fácil de implementar. Apesar de serem necessários sensores de corrente e tensão, uma das vantagens desta técnica é o facto de procurar o ponto de máxima potência independentemente das condições ambientais [5].

Consiste em causar perturbações ao sistema ou seja, aumentar e diminuir o valor da tensão do painel e comparando os novos valores da potência com o anterior, isso é conseguido variar o valor do ciclo de serviço, δ . O algoritmo calcula a potência, $P_{n-1} = I_{n-1} V_{n-1}$ tendo os valores da corrente I_{n-1} e tensão V_{n-1} de saída do painel, como se pode ver na figura 2.20.

Sempre que se aumentar ou diminuir o valor do ciclo de serviço, δ , calcula-se o valor da nova potência, P_n e compara-se com a potência anterior. Caso, aumentando o ciclo de serviço ocorra um aumento na potência, $P_n > P_{n-1}$, continua-se a alterar, aumentando-o ou diminuindo-o, o ciclo de serviço no sentido utilizado anteriormente. Caso contrário, se a potência diminuiu em relação ao valor calculado anteriormente $P_n < P_{n-1}$ altera-se o valor do ciclo de serviço no sentido contrário [5][21]. Ou seja, quando se aproxima do

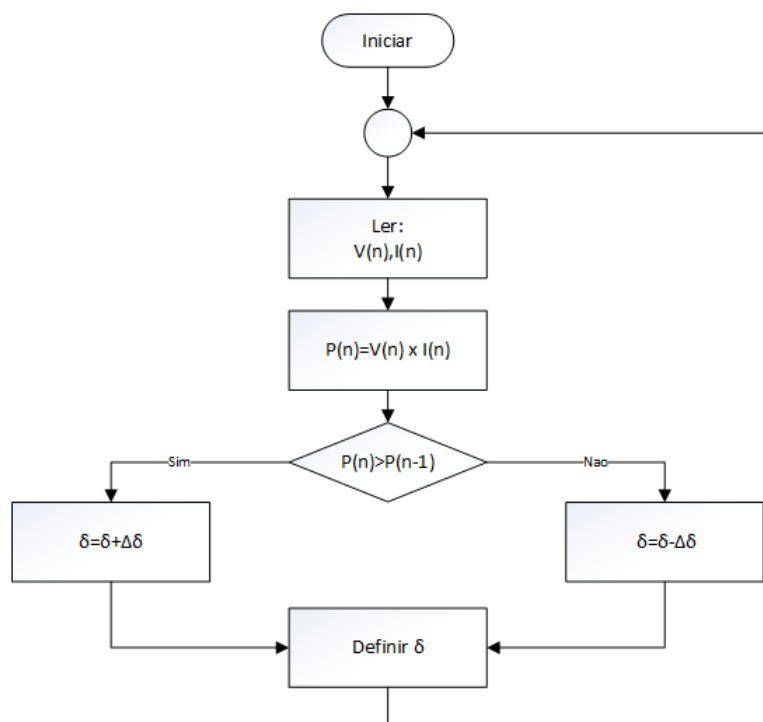


Figura 2.20: Fluxograma da Técnica Perturbar e Observar

ponto de máxima potência o valor da potência aumenta, caso contrário diminui.

Uma das desvantagens deste método além de ser considerado lento para encontrar o ponto de máxima potência é que quando encontrado o ponto de trabalho oscile em torno deste ponto, uma vez que o algoritmo muda constantemente o valor do ciclo de serviço e não se consiga ter o máximo possível de energia.

Outra desvantagem é quando as condições ambientais mudam rapidamente o algoritmo procure o ponto de máxima potência no sentido contrário ao suposto, como mostrado na figura 2.21. Neste caso o MPPT tem como ponto de trabalho B, A e C, oscilando entre os mesmos. Estando o algoritmo a oscilar do ponto A para o ponto B, havendo um aumento brusco da radiação o ponto de trabalho passa de A para D e neste caso em vez de oscilar para o ponto B passa para o ponto F. Consequentemente há um aumento de potência que faz com que o algoritmo faça perturbações no sentido contrário ao suposto. Aumentando outra vez a radiação o novo ponto de trabalho será o ponto G passando para o ponto I

em vez do H onde se encontra o ponto máximo [7].

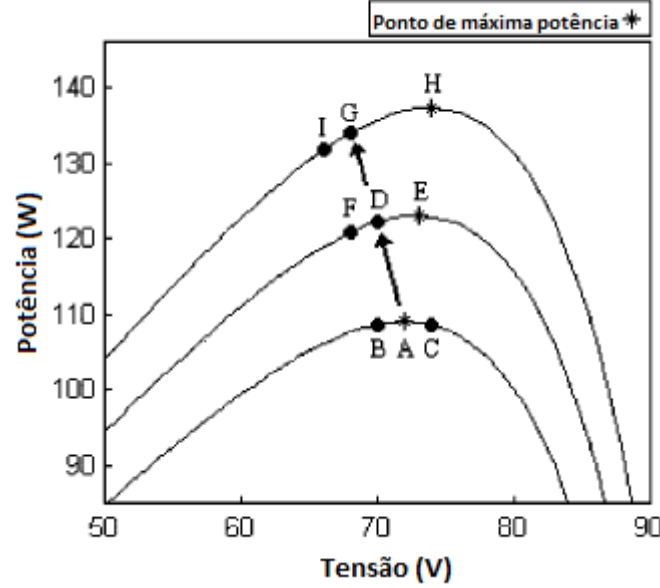


Figura 2.21: Mau funcionamento do $P\&O$ devido ao aumento brusco de radiação ([7])

Muitas melhorias foram propostas para este método entre os quais não só comparar os valores de potência, antigo e novo, mas também verificar se o valor da tensão aumentou ou diminuir consoante o valor da potência. E dependendo do caso aumentar ou diminuir o ciclo de serviço δ e consequentemente a tensão.

2.4.2 Condutância incremental

Este método de encontrar o ponto de máxima potência consiste no facto que a derivada da potência no ponto de máxima potência ser zero. Logo derivando os valores da curva de potência em ordem à tensão e igualar este valor a zero, como mostrado na equação 2.18, encontra-se o ponto máximo [7][5][22].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \times V)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0, \quad \text{em MPP} \quad (2.18)$$

Resolvendo teremos:

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (2.19)$$

Tendo em conta a figura 2.22 o ciclo de serviço aumenta ou diminui caso o painel esteja a trabalhar à esquerda ou à direita do ponto de MPP de acordo com as seguintes condições:

- $-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV}$; $(\frac{dP}{dV} = 0)$, deve-se manter o ciclo de serviço uma vez que se atingiu o MPP.
- $-\frac{I}{V} < \frac{dI}{dV}$; $(\frac{dP}{dV} > 0)$, deve-se variar o ciclo de serviço de forma a aumentar a potência de saída uma vez que o ponto de trabalho do painel encontra-se à esquerda do MPP.
- $-\frac{I}{V} > \frac{dI}{dV}$; $(\frac{dP}{dV} < 0)$, deve-se variar o ciclo de serviço de forma a diminuir a potência de saída uma vez que o ponto de trabalho do painel encontra-se à direita do MPP.

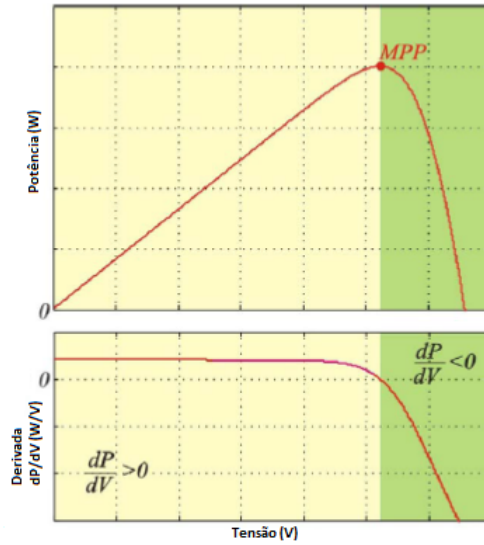


Figura 2.22: Curva da Potência de saída e sua derivada ([5])

Este método é caracterizado por serem precisos dois sensores, ser um método mais complexo que a técnica perturba e observa (*P&O*) e não oscilar muito em torno do MPP. O algoritmo mantém no MPP desde que não note mudanças ambientais com a variação do valor da corrente. Caso isso aconteça o algoritmo procurará o novo MPP variando o ciclo de serviço e consequentemente a tensão [22]. A velocidade do MPPT depende da variação

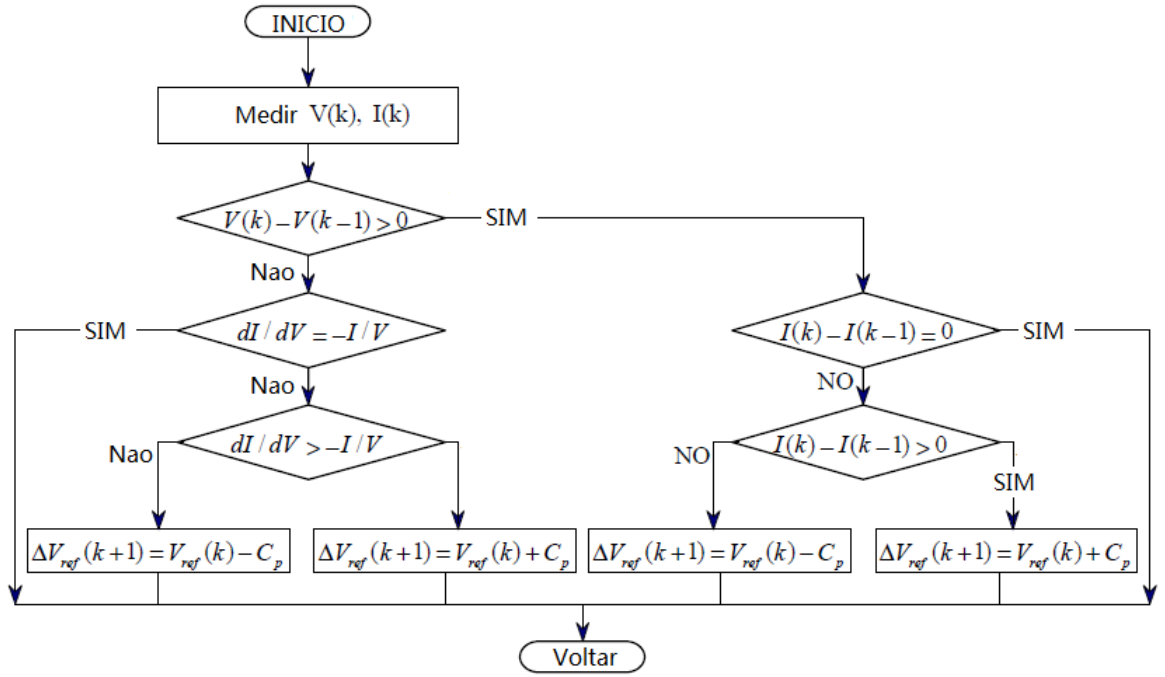


Figura 2.23: Fluxograma do método Condutância incremental ([8])

do valor do ciclo de serviço, $\Delta\delta$. Quanto maior a $\Delta\delta$ maior é a velocidade do MPPT e maior a sua oscilação em torno do MPP, sendo que este valor deve ser bem ajustado.

2.4.3 Tensão Constante

Este método advém da observação do facto de a razão entre o valor da tensão no ponto de máxima potência e a de circuito aberto ser quase constante como enunciado na equação 2.20 mesmo com condições ambientais variáveis de temperatura e radiação.

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \approx K \quad (2.20)$$

Como o valor de referência, K , depende dos valores associados ao painel que se vai utilizar é preciso primeiro determinar a tensão em vazio tendo em conta diferentes valores de temperatura e radiação. Posteriormente utilizar equações e valores predefinidos de K para determinar o MPP ou utilizar os dados fornecidos pelo fabricante. O valor do K varia normalmente entre 0,71 e 0,80 [22][7].

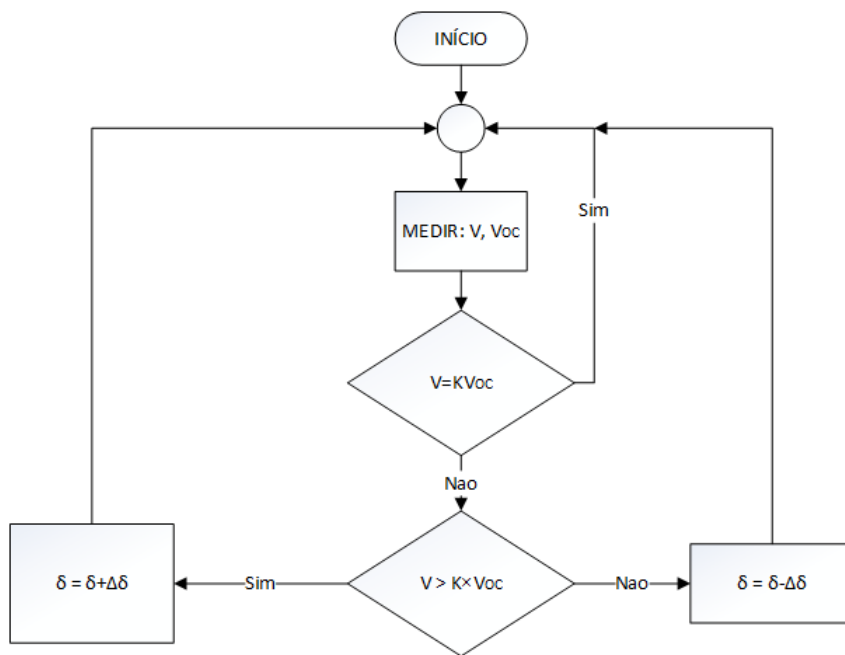


Figura 2.24: Fluxograma do método de Tensão Constante ([9])

Do intervalo definido anteriormente, normalmente o valor de referência, K , é 0,76 e o painel é controlado com tensão constante sem necessidade de se calcular a potência de saída. Este método tem a desvantagem de não conseguir acompanhar rapidamente a variação da radiação solar e fazer com que a potência de saída não seja o máximo possível. Sempre que necessário medir o valor da tensão em vazio, a energia é desperdiçada [22][9][7].

Capítulo 3

Desenvolvimento Prático

Tendo em vista a caracterização elétrica automática e a procura do ponto de máxima potência de um painel fotovoltaico foi utilizado o Arduino e um conversor DC/DC. O Arduino é uma plataforma eletrônica com uma linguagem de programação baseada no C/C++ e tem como objetivo, neste caso, de implementar o algoritmo de MPPT. Tendo em conta a corrente e a tensão do painel, o algoritmo MPPT com a ajuda de um conversor DC/DC calcula o melhor ciclo de serviço no momento para que o painel trabalhe na máxima potência como se pode ver na figura 3.1. O painel fotovoltaico que serve de estudo tem as suas características apresentadas na tabela 3.1. O conversor utilizado foi o redutor com o objetivo de baixar a tensão do painel para os 12 Volt, que corresponde à tensão de uma bateria.

Tabela 3.1: Característica do painel fotovoltaico KC40-KYOCERA .

Característica	Valor
Potencia nominal máxima(W)	40
Tensão de circuito aberto(V)	21,5
Corrente de curto-circuito(A)	2,48
Tensão de saída máxima - MPP (V)	16,9
Corrente de saída máxima - MPP (A)	2,34

De forma a obter a curva característica corrente tensão de um painel fotovoltaico, bem como, encontrar o seu ponto de máxima potência foram realizados os cálculos teóricos com o objetivo de fazer com que o conversor trabalhe no modo contínuo. Os cálculos são divididos em etapas:

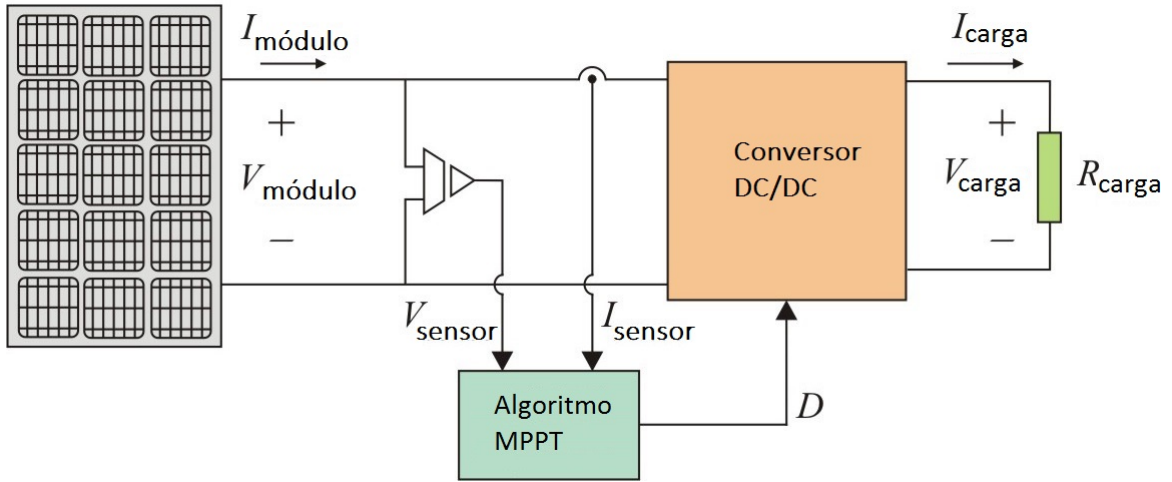


Figura 3.1: Sistema MPPT com o uso de sensores([5])

- Dimensionamento de um conversor redutor ideal: Tem o objetivo de diminuir a tensão de saída do painel fotovoltaico elevando a corrente de modo que o painel funcione no ponto de máxima potência com a ajuda do Arduino.
- Dimensionamento para obter a curva característica: Reajuste dos dispositivos do conversor redutor de forma a obter a curva característica sem danificar os mesmos.

3.1 Dimensionamento do conversor redutor

Antes de mais é preciso definir a frequência de comutação do transistor, neste caso um MOSFET. Sabendo que a frequência de comutação é inversamente proporcional à raiz dos valores do condensador e da bobine e diretamente proporcional as perdas no MOSFET. Neste caso escolheu-se uma frequência de comutação de 50 kHz.

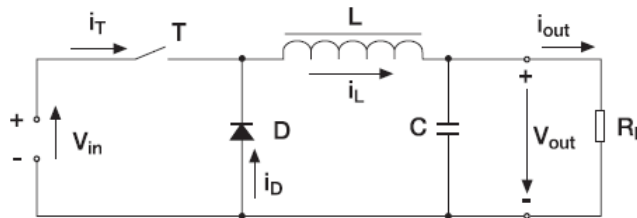


Figura 3.2: Conversor Step-down ou Buck([6])

Uma vez definida a frequência de comutação, e tendo em conta a tabela 3.1 procedeu-se ao dimensionamento considerando os componentes ideais de acordo com os parâmetros

da tabela 3.1 e 3.2.

Tabela 3.2: parâmetros para o dimensionamento do conversor redutor

parâmetros	Símbolo	Valor
Potencia nominal máxima(W)	P	40
Tensão de entrada(V)	V _{in}	21,5
Tensão de saída (V)	V _{out}	12
Frequência de comutação(kHz)	f	50
Percentagem de ondulação da corrente no indutor (%)	Δ I	35
Percentagem de ondulação da tensão do condensador (%)	ΔV _c	1

Tendo em conta a potência máxima e a tensão de saída definida, o valor da corrente de saída será:

$$I_{\text{out}} = \frac{P}{V_{\text{out}}} = \frac{40}{12} = 3,33 \text{ A} \quad (3.1)$$

Neste caso o valor da resistência de saída será:

$$R_L = \frac{V_{\text{out}}}{I_{\text{out}}} = \frac{12}{3,33} = 3,6 \text{ } \Omega \quad (3.2)$$

Para o cálculo do indutor é preciso calcular o valor do ciclo de serviço, tendo em conta os valores de tensão de entrada e saída do circuito o cálculo do ciclo de serviço será:

$$\delta = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{12}{21,5} = 0,558 \quad (3.3)$$

Tendo em conta a tabela 3.2 os valores da ondulação da corrente do indutor e ondulação da tensão do condensador pico a pico serão respetivamente:

$$\Delta I = 0,35 \times I_{\text{out}} = 0,35 \times 3,33 = 1,1655 \text{ A} \quad (3.4)$$

$$\Delta V_c = 0,01 \times V_{\text{out}} = 0,01 \times 12 = 0,12 \text{ V} \quad (3.5)$$

O valor da indutância, no modo crítico, ou seja, de forma a que a corrente se anule no final do período será[19]:

$$L_{\text{crit}} = \frac{V_{\text{out}} (1 - \delta)}{2 \times f \times I_{\text{out}}} = \frac{21,5 \times (1 - 0,558)}{2 \times 50 \times 10^3 \times 3,33} = 28,53 \mu H \quad (3.6)$$

E o valor do condensador :

$$C_{\text{crit}} = \frac{V_{\text{out}} \times (1 - \delta)}{8 \times \Delta V_c \times f^2 \times L} = \frac{12 \times (1 - 0,558)}{8 \times 0,12 \times (50 \times 10^3)^2 \times 28,85 \times 10^{-6}} = 77,44 \mu F \quad (3.7)$$

Foi utilizado o programa Multisim de forma a simular o conversor redutor com as características dos dispositivos calculados com um ciclo de serviço de 55,8% e considerando o MOSFET e o díodo ideais como mostrado na figura 3.3.

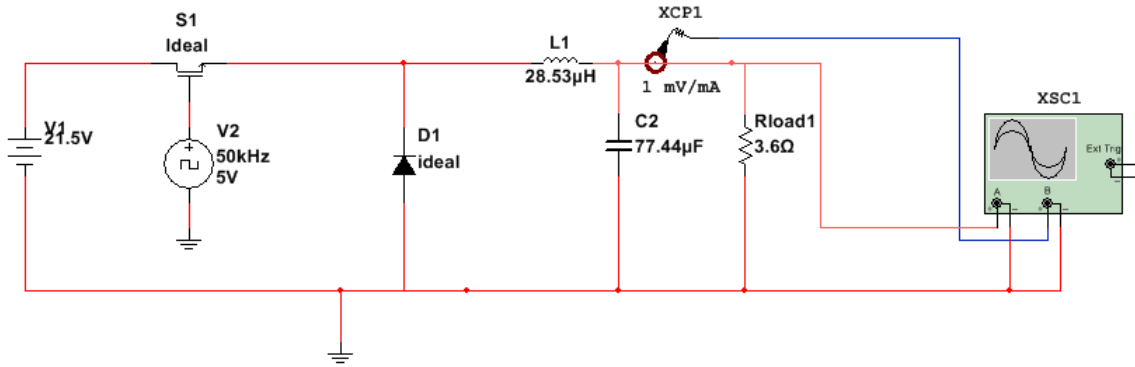


Figura 3.3: Circuito do conversor redutor ideal - Dimensionamento 1

Como se pode ver nas figuras 3.4, 3.5 e 3.6 nas simulações efectuadas os valores de tensão e corrente de saída do conversor redutor são iguais aos definidos na tabela 3.2 e na equação 3.1. Constata-se que a corrente não satura pelo que se pode concluir que para estes valores de indutância e condensador o conversor redutor funciona no modo crítico. É preciso ter em conta que os dispositivos eletrónicos a serem utilizados não são ideais pelo que na escolha do “MOSFET” é preciso ter em consideração alguns conceitos como a tensão e corrente de entrada mas também as perdas de condução e comutação.

Escolha do “gate driver” e do “MOSFET”

Tendo em conta que a corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico é 2,48 A e a sua tensão de circuito aberto ser 21,5 V procedeu-se à escolha do MOSFET de forma a suportar estes valores. Deste modo foi escolhido o MOSFET IRFZ44N com dissipador de calor com as seguintes características:

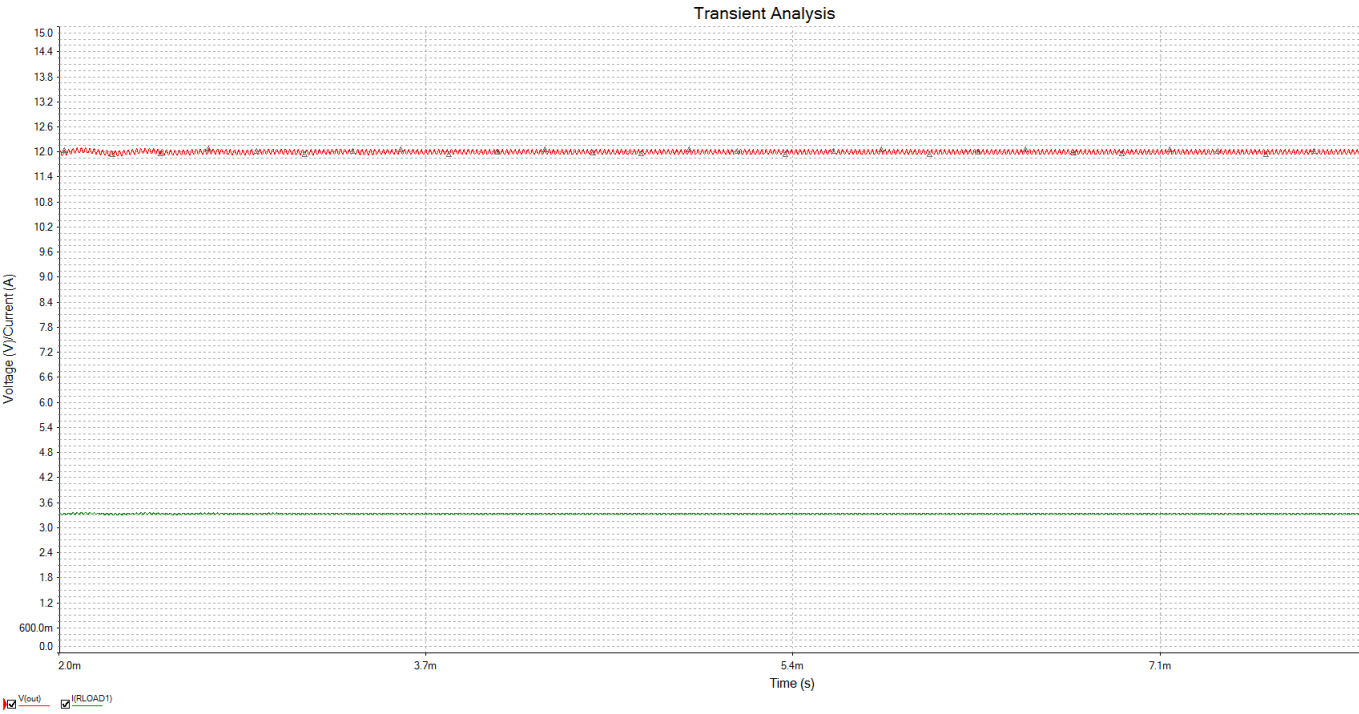


Figura 3.4: Tensão e corrente de saída do conversor redutor ideal - Dimensionamento 1

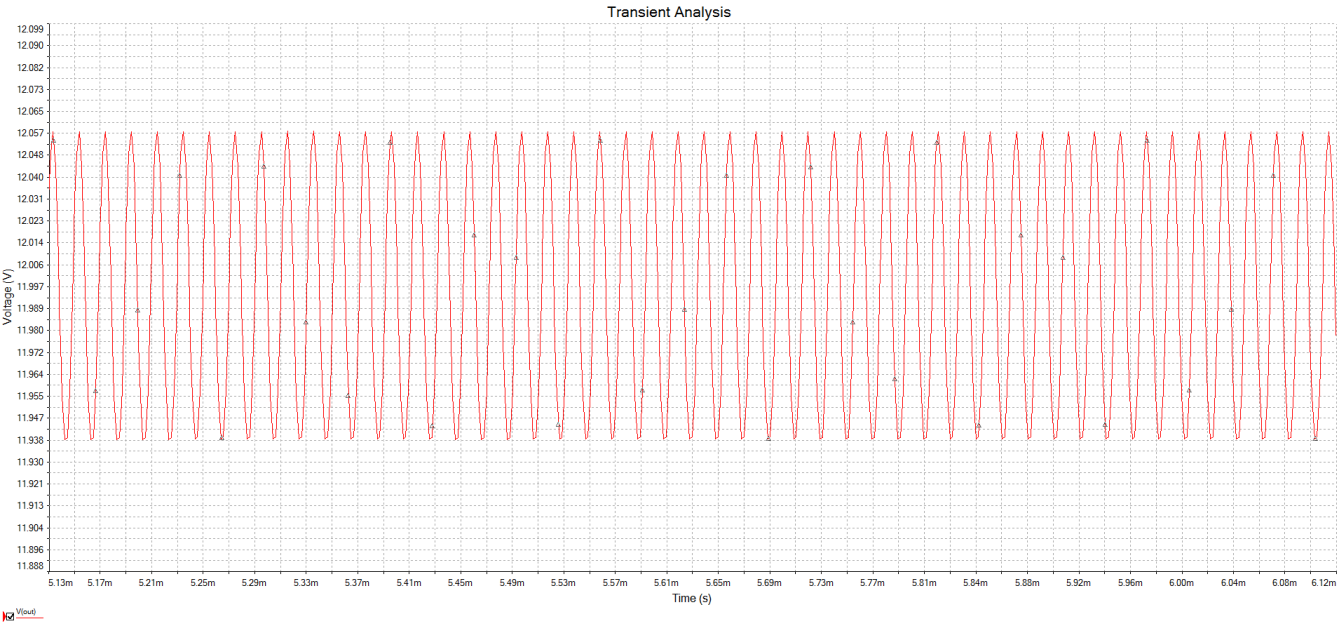


Figura 3.5: Tensão de saída do conversor redutor ideal - Dimensionamento 1

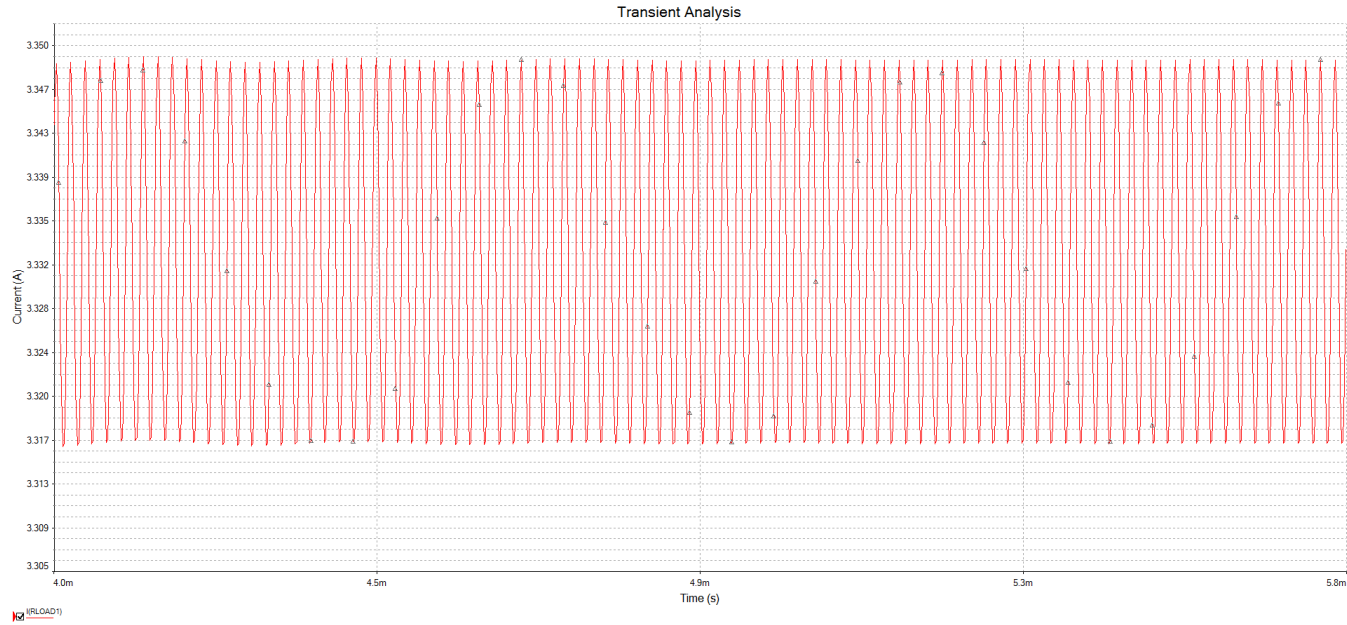


Figura 3.6: Corrente de saída do conversor redutor ideal - Dimensionamento 1

Tensão Drain-Source $R_{ds(on)}$: 55 V

V_{DS} : 17,5mV

Corrente no Dreno (I_D):49 A

O valor das perdas de condução para este MOSFET é:

$$P_{cond} = I^2 \times R_{ds(on)} = 2,48^2 \times 17,5 \times 10^{-3} = 107,632 \text{ mW} \quad (3.8)$$

E as perdas de comutação são:

$$P_{sw,on} = \frac{t_{sw,on} \times V_{DS} \times I \times f}{2} = \frac{60 \times 10^{-9} \times 21,5 \times 2,48 \times 50 \times 10^3}{2} = 79,98 \text{ mW} \quad (3.9)$$

e

$$P_{sw,off} = \frac{t_{sw,off} \times V_{DS} \times I \times f}{2} = \frac{45 \times 10^{-9} \times 21,5 \times 2,48 \times 50 \times 10^3}{2} = 59,985 \text{ mW} \quad (3.10)$$

Logo o valor das perdas de potência para o MOSFET é:

$$P = P_{cond} + P_{sw,on} + P_{sw,off} = 247,597 \text{ mW} \quad (3.11)$$

Uma vez calculados os valores dos dispositivos associados ao conversor redutor e tendo em conta os materiais disponíveis foram escolhidos os seguintes:

- Condensador: $220\ \mu F$
- Indutor: $470\ \mu H$
- Díodo: 1N4148

Como se pode ver pela figura 3.7 tendo em conta que os dispositivos não são ideais foi simulado o conversor redutor considerando o valor da tensão de entrada igual ao do ponto de máxima potência e um ciclo de serviço de 0,558. As formas de ondas dos sinais de saída encontram-se representadas na figura 3.8.

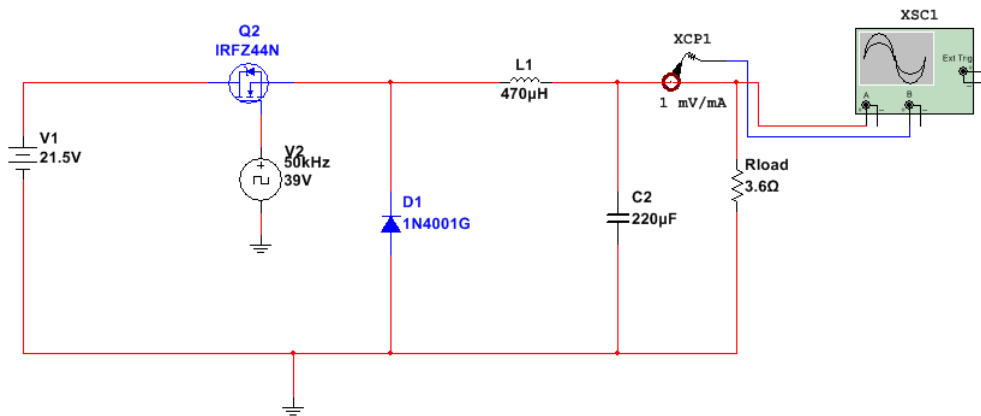


Figura 3.7: Circuito do redutor não ideal - Dimensionamento 3

De acordo com a figura 3.8, os valores de tensão de saída e corrente foram de 11,51 V e 3,197 A respetivamente. Neste caso os sinais de saída respeitam as percentagens de ondulação definidas anteriormente, na tabela 3.2.

De forma a controlar a comutação do MOSFET é preciso um “gate driver” que receba comandos do controlador Arduino em forma de tensão com um determinado valor de ciclo de serviço, amplifique o sinal e controle dois MOSFET ligados ao mesmo. Desde modo o Arduino controla o sistema.

Neste projeto foi utilizado o “Gate Driver” IR2104 como representado na figura 3.9. Foi também utilizado resistências de 10 kΩ e 2,35 kΩ a funcionar como sensores de tensão

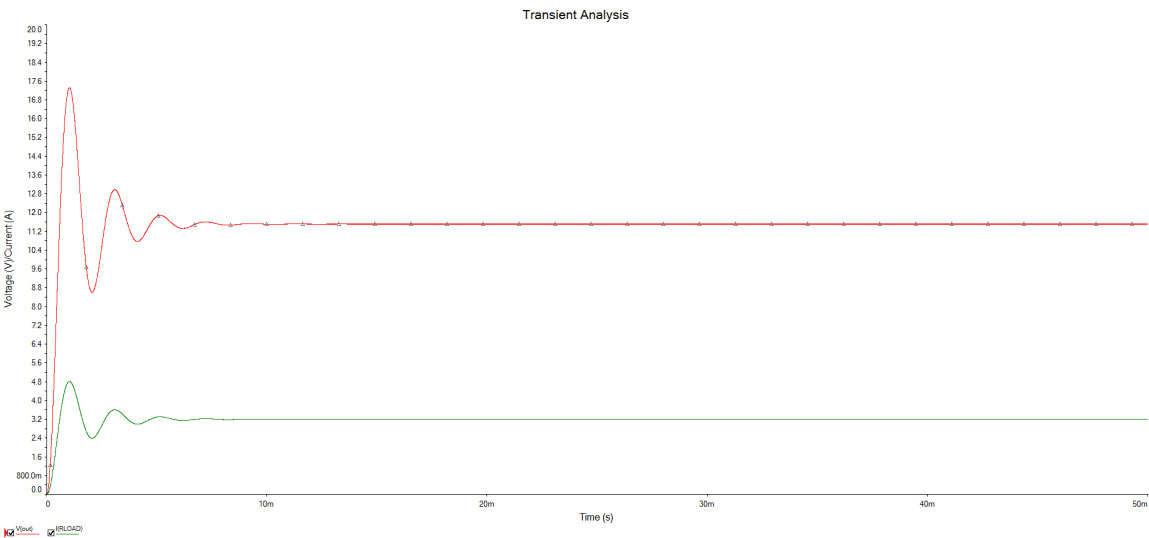


Figura 3.8: Tensão de saída do conversor redutor - Dimensionamento 2

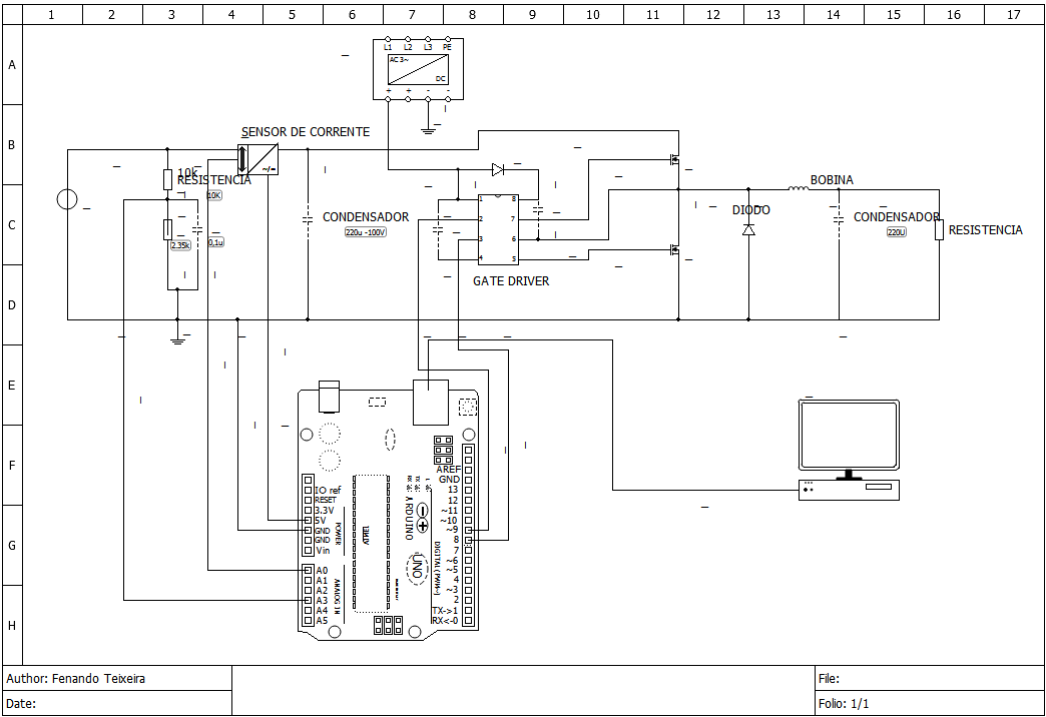


Figura 3.9: Esquema elétrico do sistema MPPT

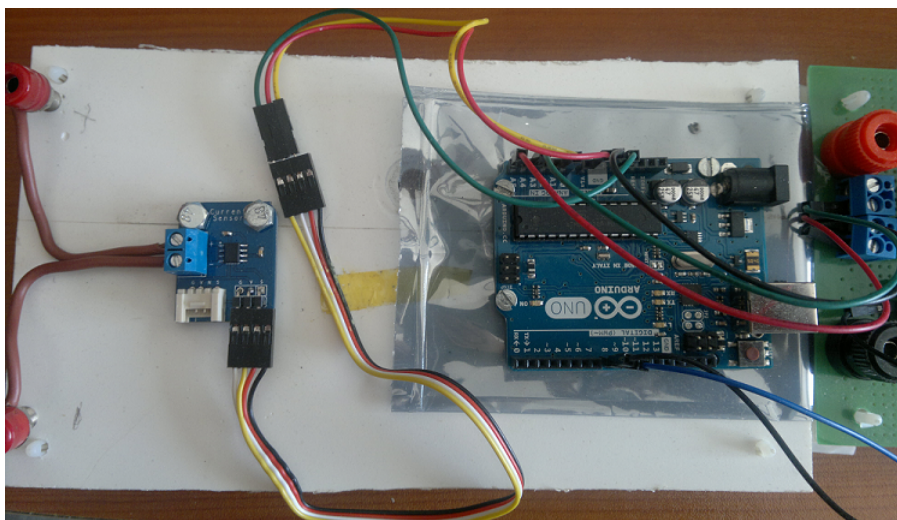


Figura 3.11: Arduino

Neste caso, de forma a obter os valores da tensão de entrada e saída do sistema é preciso fazer um divisor de tensão de forma que os sinais estejam entre 0 e 5 V. Tendo em conta que as tensões podem atingir um máximo de 21,5 V, utilizou-se resistências de 10 k Ω e 2,37 k Ω para o divisor de tensão fazendo com que as tensões a entrada do Arduino não passem os 5V.

Em relação à corrente, foi utilizado o sensor de corrente ACS712 de 5 A e uma sensibilidade de 185 mV/A. Para um valor de corrente igual a zero envia ao Arduino a metade do valor da tensão de alimentação, neste caso 5 V. Desta forma é preciso retirar 510 bits na leitura do sensor. O valor da tensão por bit para o arduino é de 5/1023 igual a 0,004887586 e tendo em conta a sensibilidade de 0,185 V do sensor, a razão entre as duas é de 0,02641. De forma a trabalhar com números inteiros, multiplicando a razão pelo número de bits, 1023, sendo igual a 27,03 a fórmula de calcular a corrente é:

$$(Valor\ do\ sensor - 510) \times 27,03/1023 \quad (3.12)$$

A saída de Arduino é uma onda PWM de 50 kHz que controla o conversor redutor.

De forma a obter os valores de entrada e os calculados pelo Arduino foi utilizado o programa “CoolTerm” que envia os dados para um ficheiro de texto.

3.2.2 Algoritmo implementado e programação

De forma a obter a curva de característica de um painel fotovoltaico foi criado o procedimento “Tirar_Car” que percorre os valores de zero a mil representando um ciclo de serviço de zero a cem por cento. Em cada iteração o procedimento faz a média de oito valores das grandezas de entrada, corrente e tensão utilizando a função “Ler_dados”.

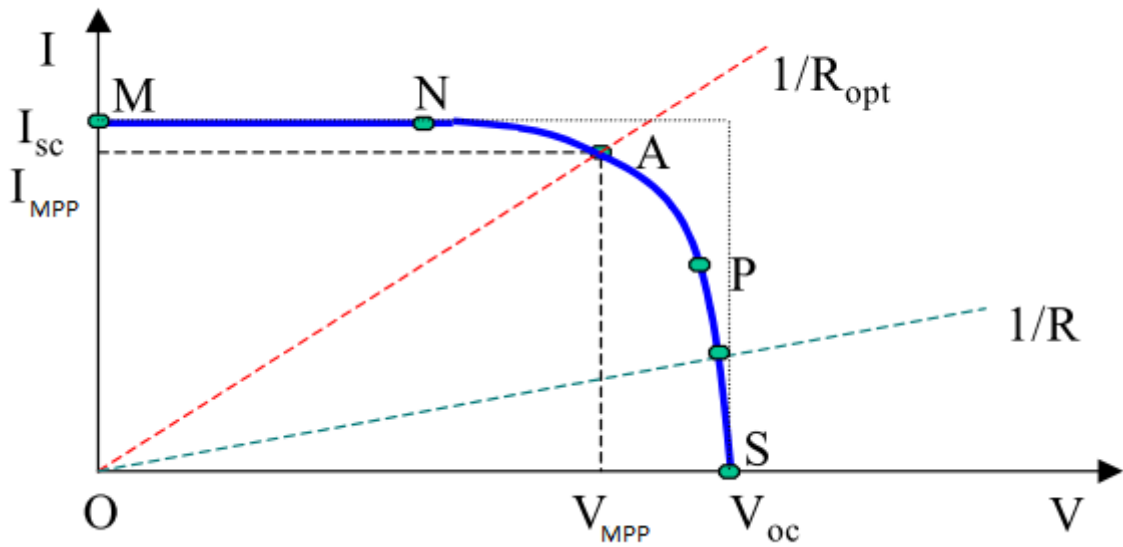


Figura 3.12: Curva característica I-V de uma painel fotovoltaico([2])

Tendo em conta a figura 3.12 para um valor de ciclo de serviço for 0,001, o painel está no ponto S pelo que se obtêm o valor da tensão em aberto V_{oc} . Para um valor de ciclo de serviço for 0,999, o painel está no ponto M pelo que se obtêm o valor da corrente em curto-circuito I_{sc} .

O valor do ciclo de serviço para o ponto de máxima potência é calculado comparando em cada iteração a potência atual com o máximo obtido anteriormente. Caso se verifique um valor maior o procedimento guarda os valores de ciclo de serviço, corrente, tensão e a potência.

Uma vez percorridas as 1001 iterações, que equivale a 100%, o programa retorna os valores guardados. De forma a obter melhores resultados o primeiro e o ultimo valor são

desconsiderados, desta forma o ciclo de serviço máximo e mínimo serão 99,9 e 0,1%. As funcionalidades descritas podem ser vistas no fluxograma da figura 3.13.

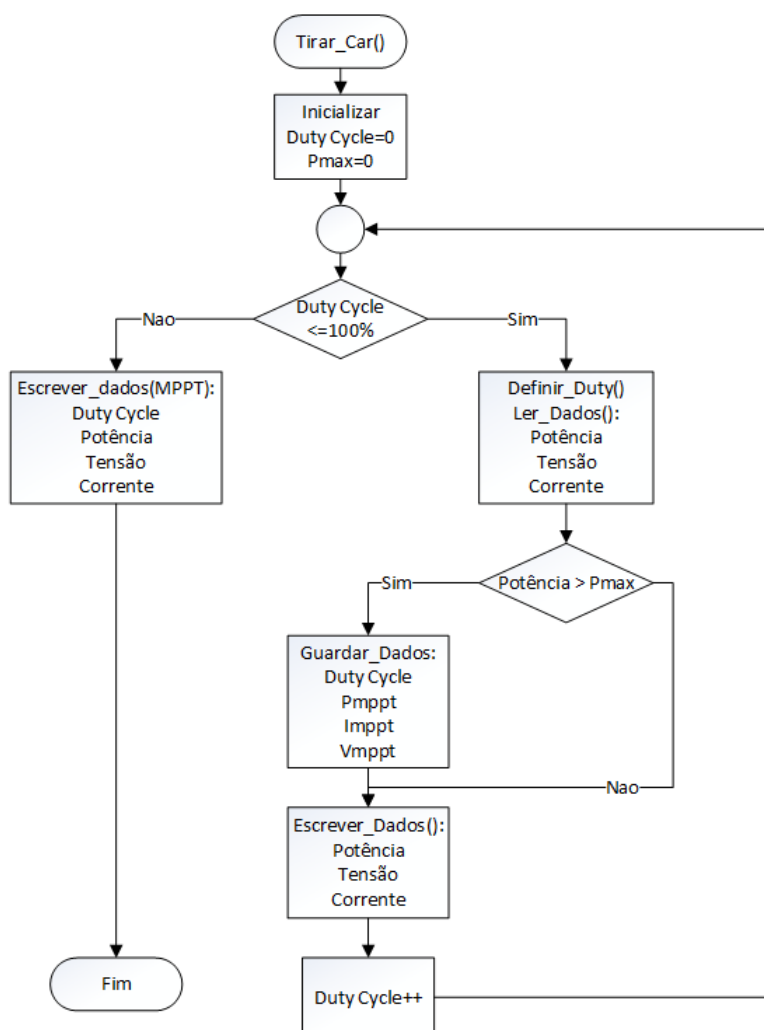


Figura 3.13: Fluxograma do procedimento `Tirar.Car`

O algoritmo implementado para a procura do ponto de máxima potência é o Perturba e Observa apresentado no capítulo do estado da arte. Foi criado o procedimento “`Painel.Mppt`” que tem três modos de trabalho sendo os quais Ligado Desligado e MPPT.

No modo Ligado o Arduino liga o MOSFET e verifica os valores de tensão e potência do painel fotovoltaico. Caso a tensão seja inferior a um valor mínimo indica que esta a escurecer e é ativado o modo Desligado até que a tensão de saída seja alcançada. Se a potência obtida for maior do que um valor mínimo definido é ativado o modo “MPPT”, caso contrário, é definido o ciclo de serviço com o seu valor máximo.

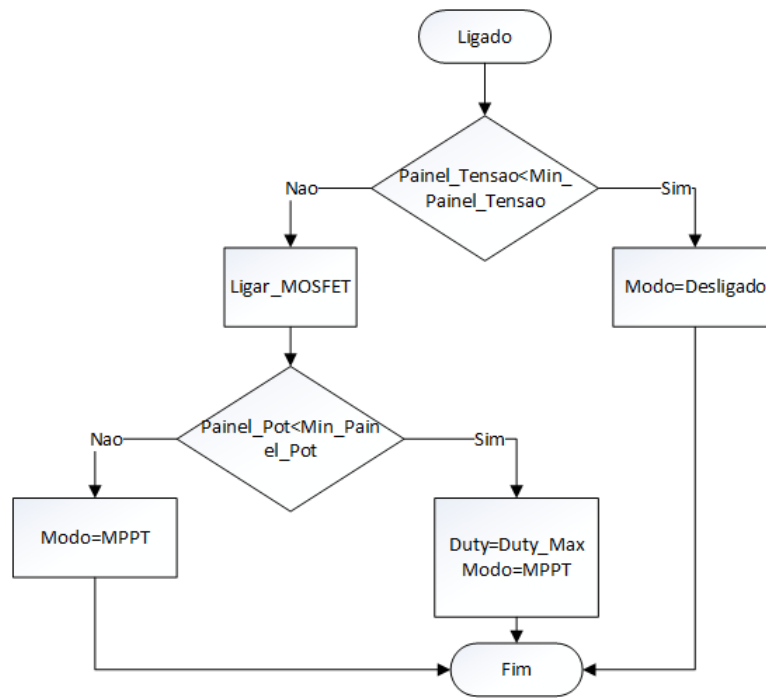


Figura 3.14: Fluxograma do Modo Ligado

O modo MPPT executa o algoritmo Perturba e Observa comparando a potência anterior com a atual. Sempre que a potência anterior for maior que a atual, ou seja, haver um decréscimo da potência, o procedimento inverte o sinal do valor Delta que é adicionado ao ciclo de trabalho. Desta forma, o valor do ciclo de serviço pode aumentar ou diminuir dependendo do sinal do Delta.

Posteriormente o valor do Delta é somado ao valor do ciclo de serviço, “duty cycle”, quer mude de sinal ou não, guardando o valor das potências, atual e antiga. Desta forma na próxima iteração ha um novo valor do ciclo de trabalho utilizado pelo conversor redutor definido pelo Arduino como se pode ver na figura 3.15.

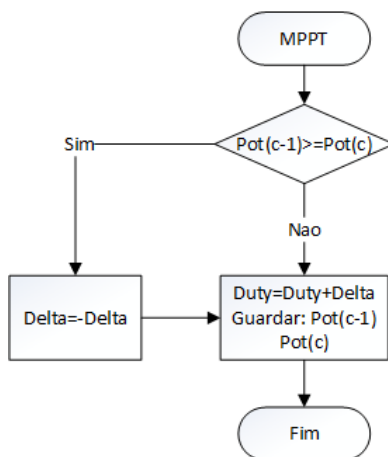


Figura 3.15: Fluxograma do Modo MPPT

O modo desligado define o ciclo de serviço igual ao inicial e desliga o MOSFET e ativa o modo Ligado. O procedimento completo pode ser visto na figura do “Painel_Mppt”.

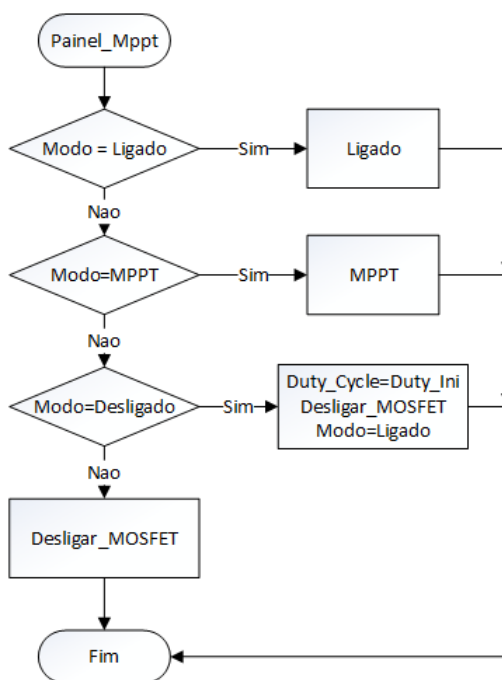


Figura 3.16: Fluxograma do Procedimento Pannel_Mppt

O esquema do funcionamento geral desde a inicialização do programa, da execução do procedimento para obter a curva característica, da procura de ponto de máxima potência pode ser observado no fluxograma da figura 3.17.

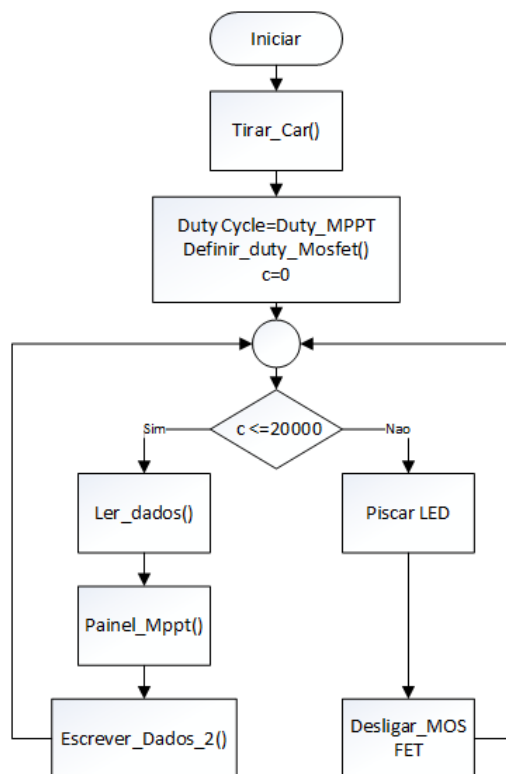


Figura 3.17: Fluxograma do Programa

O programa obtém os parâmetros associados ao painel e define o ciclo de serviço inicial igual ao valor encontrado no ponto de máxima potência. A partir deste momento o programa executa a função de procura do ponto de máxima potência com variações de 0,25 %. Mesmo que o valor do ciclo de serviço do ponto de máxima potência, encontrado na função “Tirar.Car” não seja definido como o ciclo de serviço inicial o programa procura e encontra o ponto de máxima potência.

3.3 Ensaios e resultados

Nesta secção são apresentados os ensaios realizados no departamento de Engenharia Eletrotécnica utilizando o protótipo desenvolvido, como se pode ver na figura 3.18, ligado ao painel fotovoltaico KC40-KYOCERA com as características descritas na tabela 3.3.



Figura 3.18: Ensaio do protótipo

Tabela 3.3: Característica do painel fotovoltaico KC40-KYOCERA.

Característica	Valor
Tensão de circuito aberto(V)	21,5
Corrente de curto-circuito(A)	2,48
Potencia nominal máxima(W)	40
Tensão de saída máxima-MPP (V)	16,9
Corrente de saída máxima-MPP (A)	2,34

Os ensaios foram realizados no terraço do departamento de Engenharia Eletrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. A resistência de carga colocada à saída do protótipo foi uma resistência variável de 10Ω normalmente com o valor de resistência de 4Ω . De forma a alimentar o “Gate Driver”, IR2104, foi utilizado uma fonte de alimentação existente no departamento como se pode ver na figura 3.18.

O protótipo proposto, tendo em conta a caracterização elétrica do painel fotovoltaico, recolhe 1001 amostras para valores de ciclo de serviço de zero a cem por cento. O micro-

controlador escreve os valores do ciclo de serviço, potência, tensão de entrada, corrente de entrada e tensão de saída. O tratamento dos dados é realizado utilizando o Microsoft Excel.

De modo a verificar os valores de tensão e corrente foram utilizados multímetros numa fase inicial dos ensaios, realizados vários testes durante o mês de junho de 2014. Uma vez tendo os valores que caracterizam o painel nesse momento, como é o caso do valor da potência máxima, o microcontrolador executa a função de procura do ponto de máxima potência. Tendo encontrado este ponto o protótipo deve oscilar em torno do ponto de máxima potencia ou caso as condições ambientais mudem, procurar o novo ponto de máxima potência.

Um dos primeiros ensaios realizados encontra-se na figura 3.19, os valores de saída em relação à característica do painel e do ponto de máximas potências são encontrados na tabela 3.4.

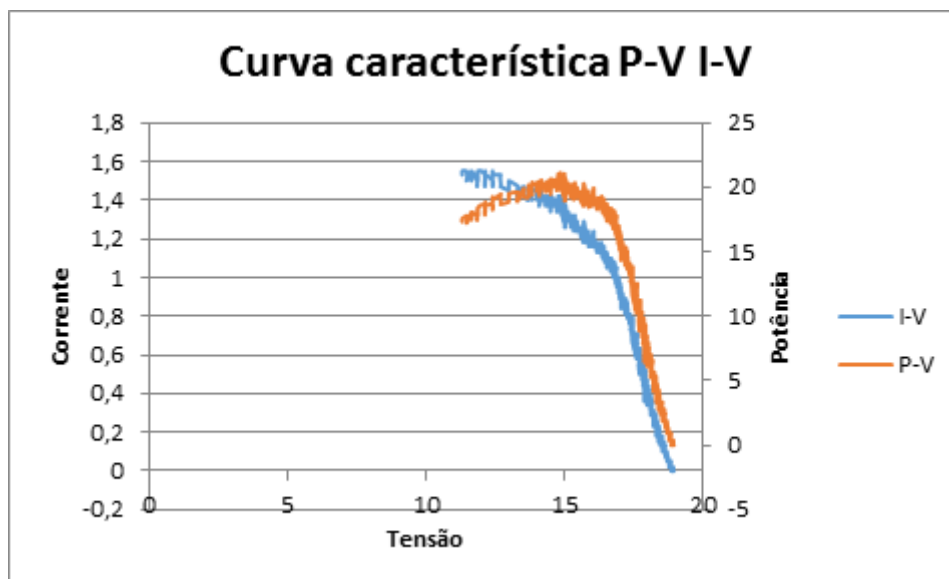


Figura 3.19: Curva característica P-V I-V - Primeiros ensaios

Este ensaio foi realizado no dia dez de julho de 2014, no final da tarde, não havendo muita radiação solar, com uma resistência de carga de 7Ω . Como se pode ver pela figura 3.19 o desenho da curva não é muito satisfatório e deve-se ao facto de para valores de ciclo de serviço menores que treze por cento a corrente é sempre quase zero.

Tabela 3.4: Parâmetros da característica do painel- Primeiros ensaios

Ciclo de serviço(%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{mpp} (W)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)
85,3	18,95	1,53	21,12	14,87	1,42

Em relação à procura do ponto de máxima potência verifica-se que neste caso o algoritmo oscila muito em torno do ponto de máxima potência, pois o ciclo de serviço varia muito.

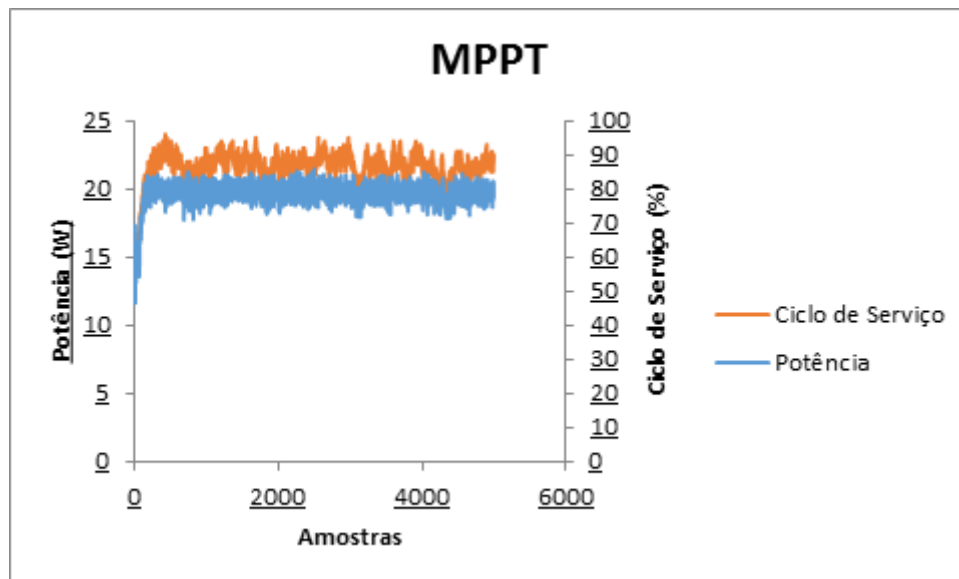


Figura 3.20: Saída do MPPT- Primeiros ensaios

Mesmo assim, neste caso, tendo em conta que a potência máxima calculada anteriormente é de 21,12 W verifica-se que o protótipo consegue procurar o MPP. Foram realizados mais ensaios de forma a otimizar a caracterização do painel com vários valores de resistências sem considerar os a sua afetação em relação ao MPPT. Os resultados encontra-se na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Parâmetros da característica do painel- Ensaios para varias resistências

Resistência de carga (Ω)	Ciclo de serviço (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{mpp} (W)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)
0	31,53	19,51	2,48	31,53	13,59	2,32
1	60	18,92	1,87	18,93	12,88	1,47
2	51	18,9	1,9	24,34	14,66	1,66
5	87	18,84	2,21	30,30	15,15	2,00
7	85,3	18,95	1,53	21,12	14,87	1,42
8	64,2	19,1	2,00	25,29	14,79	1,71

Para os vários valores de resistências constatou-se que quando menor a resistência melhor o desenho da curva característica do painel para baixos valores de tensão. Desta forma foi realizado ensaios com valores de resistências de carga igual a zero. O resultado é mostrado na tabela 3.6 e a caracterização da curva na figura 3.21.

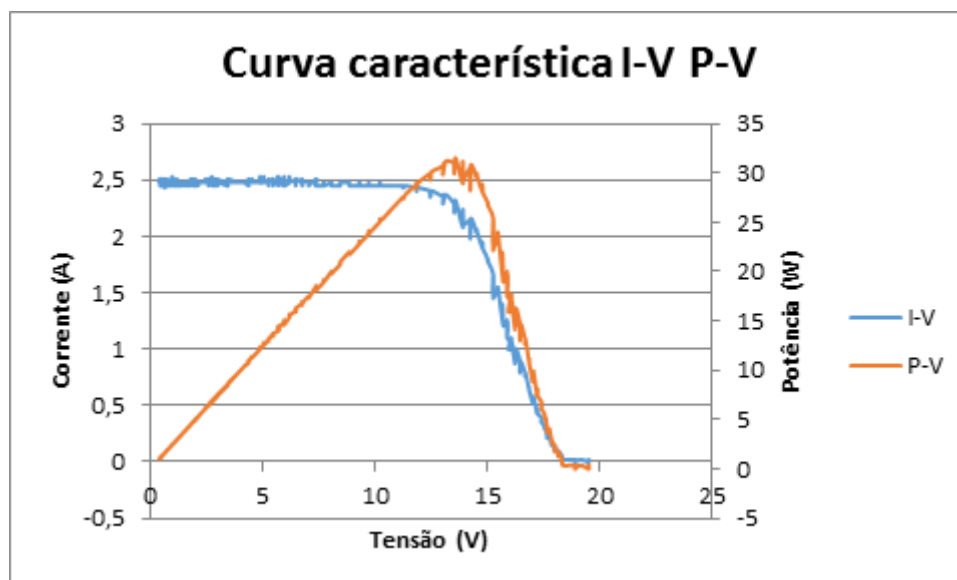


Figura 3.21: Curva característica I-V P-V - Resistência de carga nula

Mas mesmo assim a bobina utilizado danificou-se e foi substituída por uma existente no departamento com uma indutância de 5,11 mH e uma resistência de 1,46 Ω e com a saída em curto-circuito. Desta forma realizou-se vários ensaios com nova bobina que melhorou os resultados dos ensaios.

Tabela 3.6: Parâmetros da característica do painel- Ensaios com saída em curto-circuito

Ensaio	Ciclo de serviço (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{mpp} (W)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)
1	48,20	19,23	2,45	31,74	14,36	2,21
2	47,60	19,43	2,48	35,37	15,05	2,35
3	47,40	19,46	2,48	34,33	14,99	2,29
4	47,20	19,71	2,43	34,51	15,07	2,29
5	47,60	19,61	2,40	33,46	14,74	2,27
6	47,60	19,74	2,40	33,64	14,82	2,27
7	45,80	19,81	2,32	33,18	15,15	2,19

De acordo com a tabela 3.6 e a figura 3.22 a potência atinge valores superiores a 30 W

para valores de ciclo de serviço entre quarenta a cinquenta por cento. A potência máxima atinge valores de 31,74 a 35,37 W.

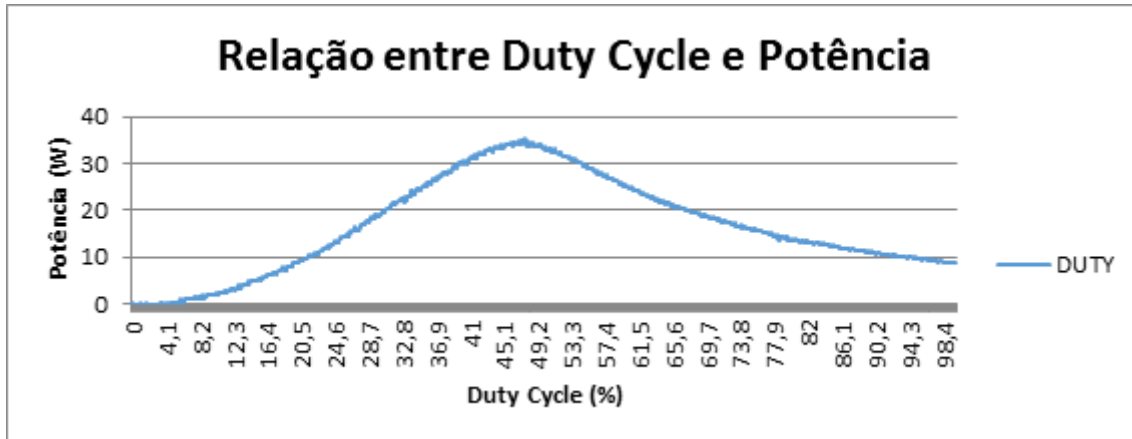


Figura 3.22: Relação entre ciclo de serviço e Potência

Desta forma foram realizados ensaios finais num dia em que a radiação solar era elevada de forma a conseguir valores de potência parecidos com os fornecidos com o fornecedor, como se pode ver na tabela 3.7. Nestes ensaios a potência de saída atingiu 36,03 W muito perto dos valores definidos pelo fornecedor.

Tabela 3.7: Parâmetros da característica do painel- Ensaios Finais

Ensaios	Ciclo de serviço (%)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{mpp} (W)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)
8	47,00	19,99	2,40	34,84	15,35	2,27
9	47,10	20,02	2,45	34,80	15,33	2,27
10	49,10	20,20	2,48	35,67	15,05	2,37
11	48,10	20,07	2,48	35,86	15,66	2,29
12	48,30	20,09	2,48	36,03	15,53	2,32

Tendo em conta os parâmetros obtidos nos ensaios finais ensaio representados na da tabela 3.7 e os valores obtidos pelo MPPT, a curva característica I-V e P-V do painel pode ser observado nas figuras 3.23 e 3.24 respetivamente. Nas figuras 3.25 e 3.26 encontra-se os gráficos que mostram o comportamento do protótipo na procura do ponto de máxima potência.

Os ensaios foram realizados com um intervalo de tempo de 10 minutos com os parâmetros

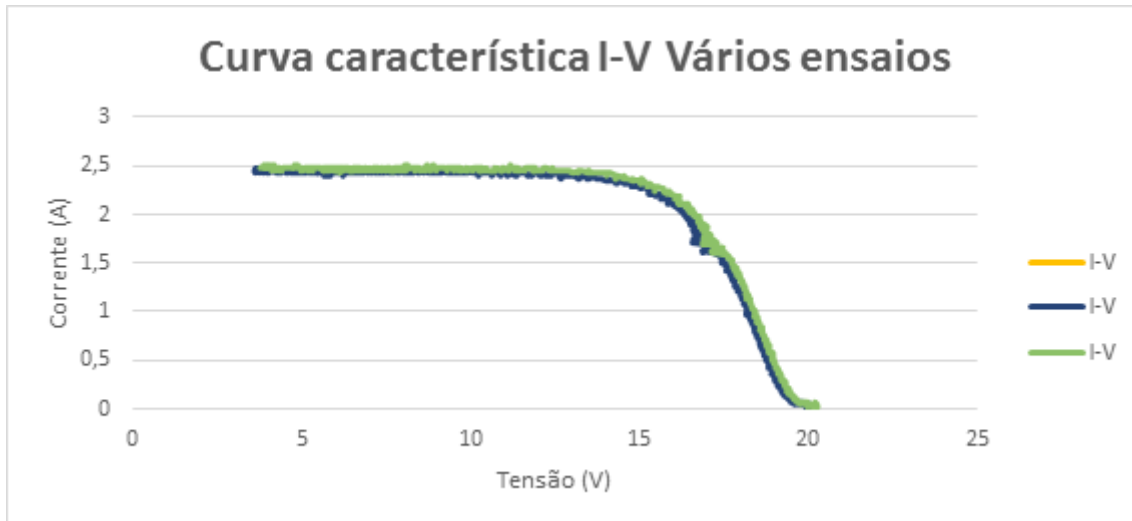


Figura 3.23: Curva característica I-V - Ensaio Finais

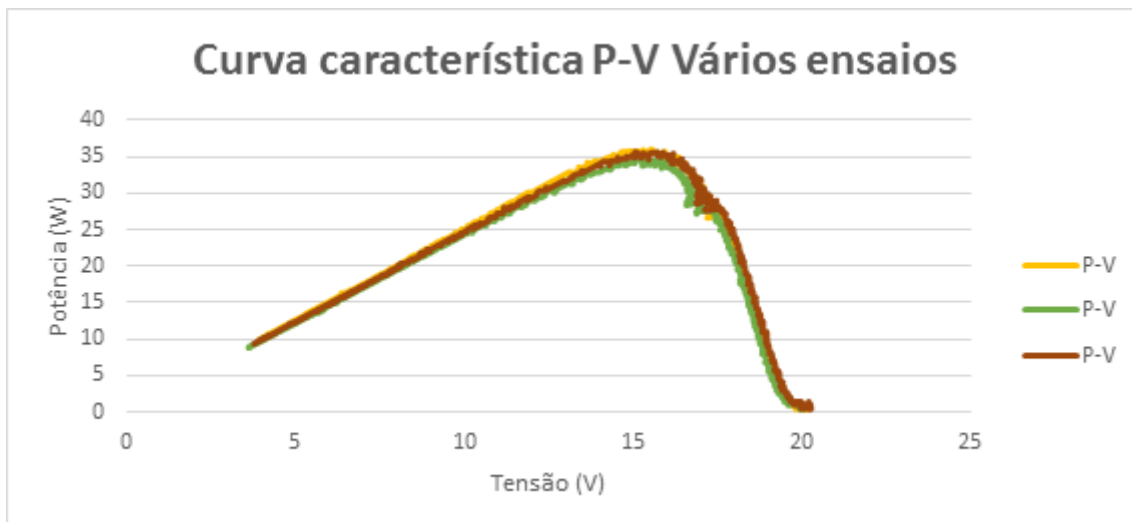


Figura 3.24: Curva característica P-V - Ensaio Finais

da curva de característica associada aos vários ensaios a não variar muito. O desenho da curva característica do painel não é completo pelo facto de bobina utilizada ter uma resistência associada. Em relação às figuras 3.25 e 3.26 confirma-se que o protótipo segue o ponto de máxima potência mantendo o valor da potência estável. Este valor é em media 35 W como se pode confirmar com a figura 3.24. Na figura 3.26 vê-se que a potência de saída desenha um círculo quase perfeito enquanto o valor do ciclo de serviço oscila.

Tendo em conta a tabela 3.8, a comparação dos dados do fornecedor com um dos ensaios, conclui-se que os valores dos parâmetros obtidos pelo protótipo são próximos dos

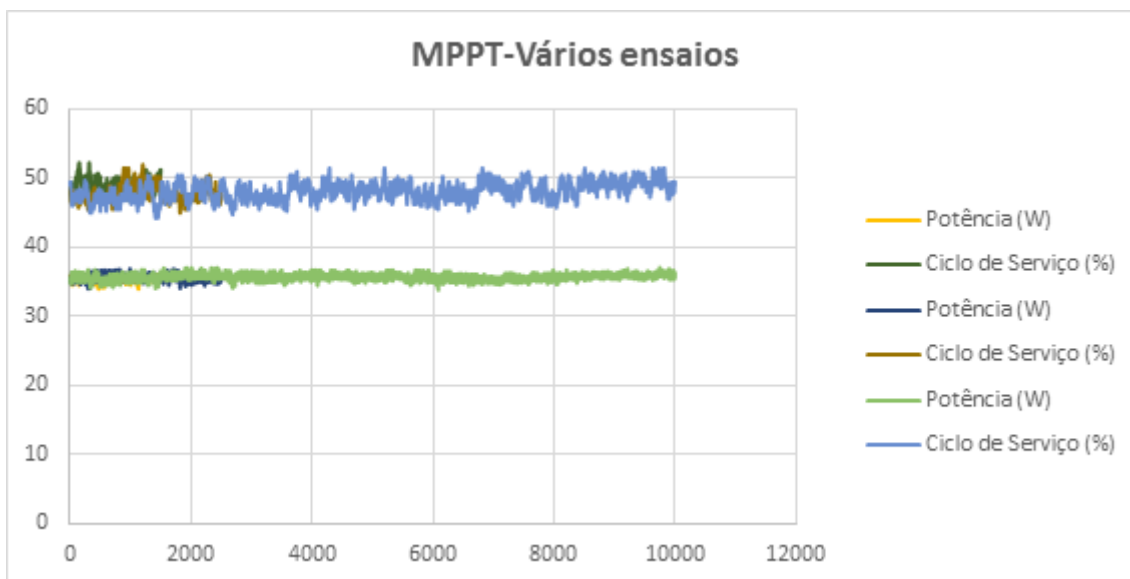


Figura 3.25: Saída do MPPT- Ensaios Finais

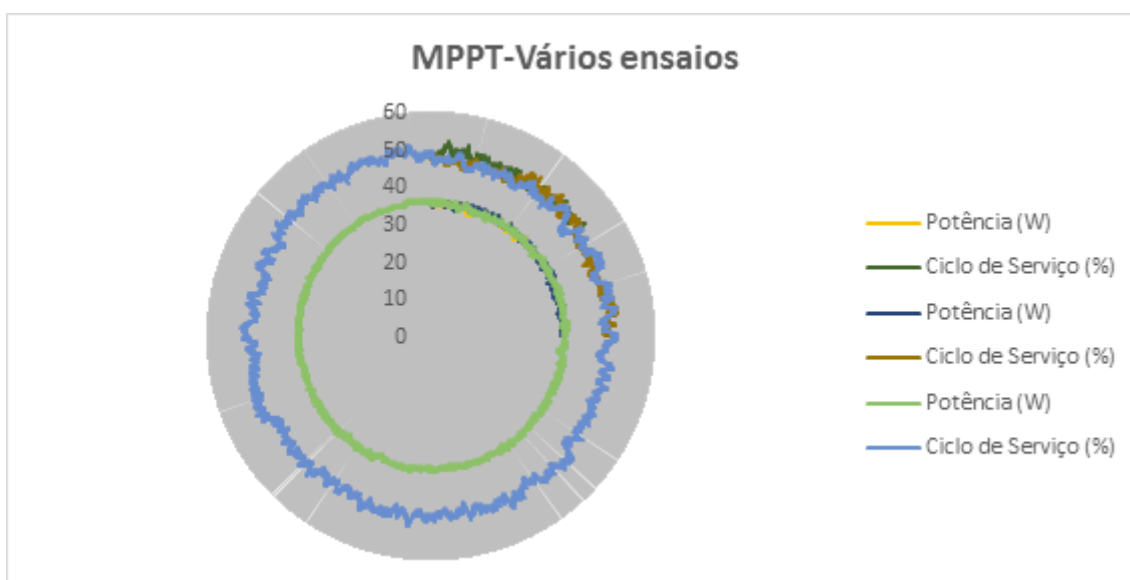


Figura 3.26: Saída do MPPT- Ensaios Finais Radar

fornecidos e comparando a figura 3.23 à figura 3.27 verifica-se que a curva obtida nos ensaios assemelha-se à curva do fornecedor. O valor da corrente de curto-circuito é igual ao do fornecedor mas a tensão em vazio não atinge o seu valor máximo devido a perdas do circuito e ou erros no cálculo da tensão devido às resistências utilizadas no divisor de tensão que desempenhou a função de sensor. A potência máxima atingiu valores de 36 W muito perto do máximo de 40 W estabelecido pelo fornecedor.

Tabela 3.8: Comparação fornecedor protótipo

Parâmetros	Fornecedor	Ensaio
Tensão de circuito aberto (V)	21,5	20,09
Corrente de curto-circuito (A)	2,48	2,48
Potencia nominal máxima (W)	40	36,03
Tensão de saída máxima-MPP (V)	16,9	15,53
Corrente de saída máxima-MPP (A)	2,34	2,32

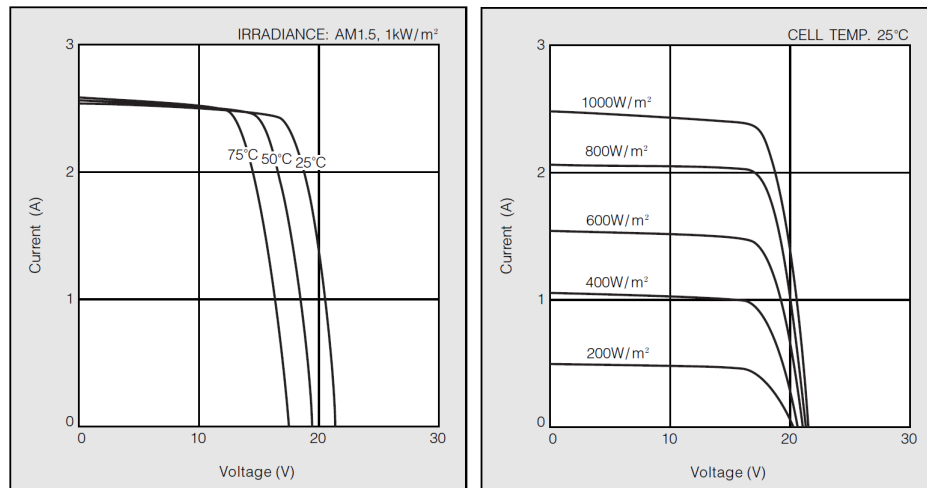


Figura 3.27: Curvas Características - Fornecedor

De forma verificar que o protótipo consegue acompanhar o ponto de máxima potência em condições de variação brusca de radiância solar realizou-se um ensaio em que o painel era coberto por alguns instantes. Neste caso como a tensão do painel fotovoltaico é inferior ao valor definido o programa define o valor de ciclo de trabalho como o mínimo definido.

Como se pode verificar na figura 3.28 o protótipo responde rapidamente às perturbações encontrando sempre o ponto de máxima potência, mesmo que a potência assuma valores próximos de zero, por falta de radiância solar, o dispositivo consegue rapidamente voltar ao ponto de máxima potência.

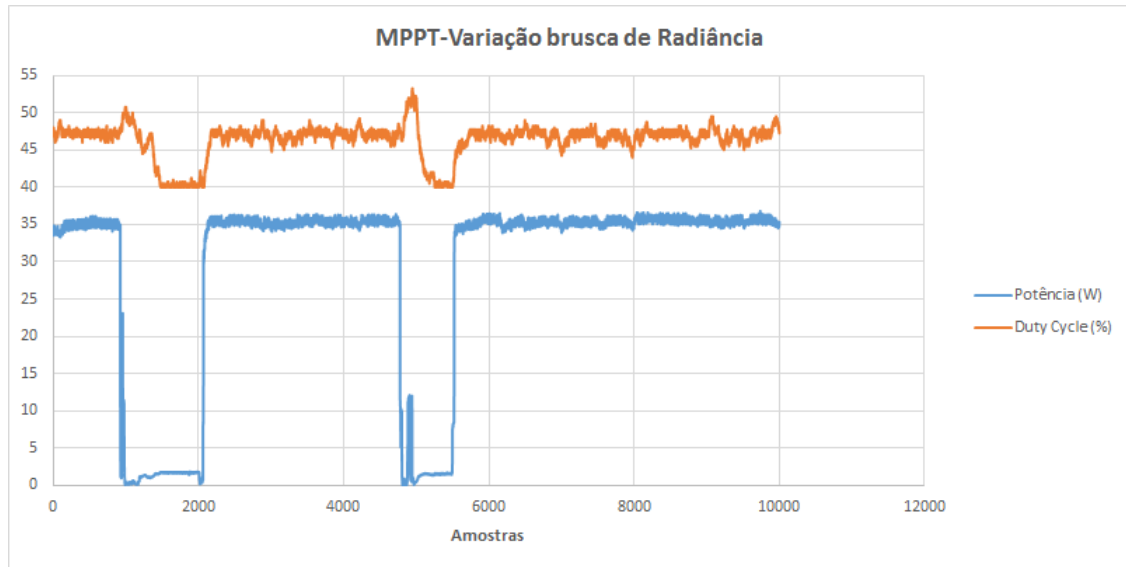


Figura 3.28: Saída do MPPT - Variação de radiância

3.4 Custos do protótipo

Na tabela 3.9 encontra-se os componentes que constituem o protótipo desenvolvido bem como os valores praticados no mercado. De notar que os preços podem variar de acordo com o fornecedor. Neste caso o custo total foi de 44,3€.

Tabela 3.9: Custos do Protótipo

Componentes	Quantidades	Custos (€)	Custo Total (€)
Arduíno UNO	1	19,31	19,31
Sensor AC712	1	6,5	6,5
Gate Driver IR2104	1	2,25	2,25
Bobina 470uH	1	2,77	2,77
Díodo rápido UF4007	1	0,39	0,39
Díodo 1N4148	1	0,02	0,02
MOSFET IRF44N	2	0,56	1,12
Resistência 10k ohm	2	0,05	0,1
Resistência 2,35 k ohm	2	0,05	0,1
Condensador de 220micro F	2	0,25	0,5
Condensador de 0,1 micro F	4	0,08	0,32
Placa de circuitos impresso	1	4,92	4,92
Conectores	4	1,5	6
Custos			44,3

Capítulo 4

Conclusões e trabalhos futuros

Esta dissertação tinha como objetivo desenvolver um protótipo capaz de obter a curva característica de um painel fotovoltaico e os parâmetros associados, bem como executar a função de procura do ponto de máxima potência.

Estudou-se e neste caso descreve-se a constituição do painel fotovoltaico e o seu funcionamento, o seu modelo elétrico e as funções associadas. Tendo em vista obter a curva característica do painel estudou-se os pontos associados as curvas I-V de um painel e desta forma definiu-se a forma da curva esperada.

Foram apresentados, no segundo capítulo, os vários tipos de conversores DC/DC que normalmente são associados a um circuito MPPT donde escolheu-se utilizar o conversor redutor de forma a obter uma tensão inferior ao do painel, fazendo com que o sistema pudesse por exemplo alimentar uma bateria.

Apresentou-se vários algoritmos de procura do ponto de máxima potência utilizados atualmente tendo em conta os aspetos positivos e negativos de forma a escolher um que seja de fácil implementação e garanta bons resultados. Nesta dissertação foi utilizado o algoritmo Perturba e observa.

Desta forma foram realizadas simulações para o desenvolvimento de um conversor re-

dutor que consiga trabalhar no modo contínuo utilizando o painel em estudo. A quando da criação do conversor redutor, encontrou-se algumas dificuldades em implementar o Gate Driver que controla o “MOSFET” associado ao conversor redutor, sendo superadas pela utilização de um dissipador de calor e uma fonte de tensão externa.

Uma vez construído o conversor redutor, ajustando as funções de recolha das tensões de entrada e saída do painel às resistências utilizadas e a implementação da função de leitura do sensor de corrente, grande parte do tempo foi disponibilizado à melhoria das funções utilizados na procura do ponto de máxima potência e a realização de ensaios que de início não eram satisfatórios.

Os ensaios realizados foram satisfatórios e os objetivos foram alcançados com sucesso. O sistema consegue fornecer dados para o desenho da curva relativamente igual ao esperado e desta forma, obtendo os parâmetros associados ao painel como o ponto de máxima potência verifica-se que o protótipo consegue encontrar e oscilar em torno do ponto de máxima potência.

4.1 Trabalhos futuros

Apesar de os objetivos terem sido alcançados há alguns pontos que podem ser melhorados em trabalhos futuros relacionados com os painéis fotovoltaicos e o Arduino como por exemplo:

- Uso de uma bateria na saída.
- Uso de um sensor de radiação solar.
- Modificação do circuito de forma a protegê-lo caso os terminais do painel sejam ligados com os polos trocados.
- Proteger o Arduino de curto-circuito.
- Substituir o uso da fonte de tensão por uma pilha de 9 Volt.

- Implementar um sistema que permitisse a visualização instantânea dos parâmetros de saída do painel e a desenho da curva usando por exemplo um ecrã LCD.

Seria interessante, perante às dissertações apresentadas anteriormente realizar um protótipo capaz não só de desenhar a curva e obter os parâmetros associados mas também controlar um seguidor solar, aumentando assim a eficiência do sistema.

Bibliografia

- [1] C. Nemes and F. Munteanu, “An analysis of a photovoltaic panel model: Comparison between measurements and analytical models,” in *Electrical and Power Engineering (EPE), 2012 International Conference and Exposition on*, pp. 939–944, Oct 2012.
- [2] A. D. Hansen, P. Sørensen, and L. H. Hansen, *Models for a Stand-Alone PV System*, vol. 1219. RisøNational Laboratory, 2000.
- [3] “Guide to Interpreting I-V Curves.” [http://resources.solmetric.com/get/Guide to Interpreting I-V Curves.pdf](http://resources.solmetric.com/get/Guide%20to%20Interpreting%20I-V%20Curves.pdf)(Date last accessed 5-April-2015).
- [4] V. J. Fesharaki, M. Dehghani, and J. J. Fesharaki, “The Effect of Temperature on Photovoltaic Cell Efficiency,” no. November, pp. 20–21, 2011.
- [5] R. F. Coelho, F. M. Concer, and D. C. Martins, “A MPPT Approach Based on Temperature Measurements Applied in PV Systems,” 2010.
- [6] L. Wuidart, “Topologies for switched mode power supplies,” 1999.
- [7] D. P. Hohm and M. E. Ropp, “Comparative study of maximum power point tracking algorithms,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, pp. 47–62, Jan. 2003.
- [8] S.-J. Kang, J.-S. Ko, J.-S. Choi, M.-G. Jang, J.-H. Mun, J.-G. Lee, and D.-H. Chung, “A novel mppt control of photovoltaic system using flc algorithm,” in *Control, Automation and Systems (ICCAS), 2011 11th International Conference on*, pp. 434–439, Oct 2011.
- [9] J. Baek, J. Ko, and J. Choi, “Development of novel MPPT algorithm of PV system considering radiation variation,” *... and Systems (ICCAS), ...*, pp. 1235–1241, 2010.

- [10] R. Castro, *Uma introdução Às Energias Renovaveis: Eólica, Fotovoltaica e Minihídrica*. IST press, 2011.
- [11] A. Becquerel, “Memoire sur les effects d’électriques produits sous l’influence des rayons solaires,” *Annalen der Physick und Chemie*, vol. 54, pp. 35–42, 1841.
- [12] A. M. Vallêra, “Meio Século de História Fotovoltaica,” 2006.
- [13] “The history of solar.” https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf(Date last accessed 5-April-2015).
- [14] C. Fritts, “On a new form of selenium photocell,” *American J. of Science*, vol. 26, p. 465, 1883.
- [15] M. Villalva, J. Gazoli, and E. Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 1198–1208, May 2009.
- [16] R. M. Castro, “Introdução à energia fotovoltaica,” *DEEC/Secção de Energia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, 2002.
- [17] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, and Y.-J. Su, “Development of generalized photovoltaic model using matlab/simulink,” in *Proceedings of the world congress on engineering and computer science*, vol. 2008, pp. 1–6, Citeseer, 2008.
- [18] a. Durgadevi, S. Arulselvi, and S. P. Natarajan, “Study and implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm for Photovoltaic systems,” *2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems*, pp. 240–245, Jan. 2011.
- [19] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics. Converters, Applications and Design*. John Wiley and Sons, Inc, second ed., 1995.
- [20] M. H. Rashid, *Power Electronics. Circuits, Devices and Application*. first ed., 1999.
- [21] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, pp. 963–973, July 2005.

- [22] T. Eseram and P. L. Chapman, “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, pp. 439–449, June 2007.

Apêndices

Apêndice A

Código do Arduíno

```
1
2  #include "TimerOne.h"
3  // timer one  https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_TimerOne.html
4
5
6
7
8
9  //DEFINICOES e VARIAVEIS GLOBAIS
10  int sensorValue1;
11  float voltage;
12  float current;
13  int valor;
14  int MEDIA=8;
15  int c = 0;
16  int d = 0;
17  int inter = 10;
18  #define Inc 1
19  #define canal_corr_pai  A0
20  #define canal_ten_pai  A3
21  #define canal_ten_sai  A5
22  #define canal_pwm  9
23  #define canal_sd  8
24  int led = 13;
25  float sensor_cor_max = 5.0;
```

```

26  float sensor_ten_max = 3.125-2.5;
27  int duty;           //valor do duty cycle para controlar o mosfet
28  //de forma que o passo seja 0,25 multiplicou-se os duty cycle por 4
29  #define Duty_Max 400 //100%
30  #define Duty_Min 160 //40%
31  int Duty_Ini = 60;
32  #define Bit_max 1023
33  #define Min_Painel_Pot 200
34  #define Min_Painel_Tens 800
35  int Ant_Painel_Pot = 0;
36  int Ant_Ant_Painel_Pot = 0;
37  int Ant_Painel_Tens = 0;
38  int Var_Pow = 0;
39  int Var_Tens = 0;
40  int Pmax;
41  int Imppt;
42  int Vmppt;
43  int Voc;
44  int Isc;
45  int Duty_Mppt;
46  //int duty_car;
47  #define Desligar_Gate_Driver digitalWrite(canal_sd, LOW)
48  #define ligar_Gate_Driver digitalWrite(canal_sd, HIGH)
49  // #define const_res = 5,21940;                                //divisor de tensao da resi
50  float const_ten_ent = 25.5;                                    //constante de tensao
51  float const_ten_sai = 25;
52  //float const_corr=((abs(Y*(5 / 1023)) - 2,48)/((sensor_ten_max/sensor_cor_max)))*1000;
53
54  int Painel_Corr;
55  int Painel_Tens;
56  int Painel_Pot;
57  int Saida_Tens;
58  int Delta = Inc;
59  //float Duty_Mppt1;
60  //http://playground.arduino.cc/Code/Enum
61  enum modos {
62  ligado,

```

```

63     desligado,
64     mppt
65 };
66 modos modo;
67
68 ////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
69 //                                     FUNCOES
70 ////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
71
72
73
74 void setup()
75 {
76     pinMode(canal_pwm, OUTPUT);
77     pinMode(canal_sd, OUTPUT);
78     pinMode(led, OUTPUT);
79     Timer1.initialize(20);//inicializar timer e definir o periodo de 20us para tirar a cara
80     Timer1.pwm(canal_pwm, 0);
81     ligar_Gate_Driver;
82     Serial.begin(9600);    //initialize serial communication at 9600 bits per second:
83     modo = ligado;
84     int c = 0;
85     //duty = Duty_Ini;
86     Tirar_Car();
87     duty = Duty_Mppt1;
88     Definir_duty_Mosfet();
89     delay(3000);
90     Escrever_Parametros();
91     delay(1000);
92 }
93
94 void Tirar_Car()
95 {
96     for(int duty_car = 0;duty_car <= 1000;duty_car++)//valor do duty cycle varia de 0-100.
97     {
98         //dividir o valor por 10 para ter o duty cycle com uma casa decimal
99         Timer1.setPwmDuty(canal_pwm, duty_car*(long)(Bit_max-1)/1000);
100        delay(1);

```

```
100   Ler_Dados();
101   if (Painel_Pot > Pmax)
102   {
103       Duty_Mppt = duty_car;
104       Pmax = Painel_Pot;
105       Imppt = Painel_Corr;
106       Vmppt = Painel_Tens;
107
108   }
109   if (duty_car == 1)
110   {
111       Voc = Painel_Tens;
112   }
113   if (duty_car == 999)
114   {
115       Isc = Painel_Corr;
116   }
117   Escrever_Dados_1((duty_car));
118 }
119
120
121 Escrever_Car(Duty_Mppt);
122 Duty_Mppt1 = (Duty_Mppt/10.00)*4;
123 }
124
125 void Escrever_Car(int Duty_temp)
126 {
127   Serial.print(Duty_temp/10.0);
128   Serial.print(" ");
129
130   Serial.print(Pmax/100.00);
131   Serial.print(" ");
132
133   Serial.print(Imppt/100.00);
134   Serial.print(" ");
135
136   Serial.print(Vmppt/100.00);
```

```

137   Serial.print(" ");
138
139   Serial.print(Voc/100.00);
140   Serial.print(" ");
141
142   Serial.println(Isc/100.00);
143
144
145 }
146
147
148 void Escrever_Parametros()
149 {
150   Serial.print("Duty_ini: ");
151   Serial.print(duty/4.00);
152   Serial.print(" ");
153   Serial.print("Duty_Min: ");
154   Serial.println(Duty_Min/4.00);
155
156 }
157
158 //ler varias amostras e retornar a media dos valores
159 int ler_canal(int canal){
160   delayMicroseconds(50);
161   int soma = 0;
162   int i;
163
164   for (i=0; i < MEDIA; i++){
165     soma += analogRead(canal);
166     delayMicroseconds(50);
167   }
168   return(soma / MEDIA);
169 }
170
171
172
173

```

```
174
175 void Ler_Dados(){
176
177   PaineL_Tens = (int)((((ler_canal(canal_ten_pai) * const_ten_ent)+ 5)/10);
      // valor da tensao de entrada arredondado por excesso (+5) multiplicado por 100
178   PaineL_Corr = (int)(abs)((((ler_canal(canal_corr_pai) - 510) * 27.03 / 1023 * 100));
179   Saida_Tens = (int)((((ler_canal(canal_ten_sai)*const_ten_sai) + 5)/10);
      // valor da tensao de saida arredondado por excesso multiplicada por 100
180   PaineL_Pot = (int)((((long)PaineL_Tens * PaineL_Corr) + 50)/100); // int vai ate 32768
181   //delay(10);
182 }
183
184
185 //o Duty_temp varia de 0 999 logo divide-se por 10 para se ter o valor em percentagem
186 void Escrever_Dados_1(int Duty_temp)
187 {
188
189   Serial.print("1");
190   Serial.print(" ");
191   Serial.print(Duty_temp/10.00);
192   Serial.print(" ");
193   Serial.print(PaineL_Pot/100.00);
194   Serial.print(" ");
195   Serial.print(PaineL_Tens/100.00);
196   Serial.print(" ");
197   Serial.print(PaineL_Corr/100.00);
198   Serial.print(" ");
199   Serial.println(Saida_Tens/100.00);
200
201 }
202
203 void Escrever_Dados_2(int Duty_temp)
204 {
205
206   if (modo == ligado) Serial.print("1");
207   else if (modo == mppt) Serial.print("5");
208   Serial.print(" ");
```



```

209     Serial.print(Duty_temp/4.00);
210     Serial.print(" ");
211     Serial.print(Painel_Pot/100.00);
212     Serial.print(" ");
213     Serial.print(Painel_Tens/100.00);
214     Serial.print(" ");
215     Serial.print(Painel_Corr/100.00);
216     Serial.print(" ");
217     Serial.println(Saida_Tens/100.00);
218
219
220 }
221
222
223 // varia-se o valor do duty cycle na funÃ§Ã£o principal e ai se usa o valor de 0-1023
224 //duty Ã© em percentagem, temos de passar de percentagem multiplicando por 1023 e dividind
225 //-----
226 void Definir_duty_Mosfet()//controlar duty cycle do mosfet// o duty vai ser modificado na
227 //o valor do duty cycle tem de estar dentro dos intervalos, maximo e minimo.
228 //
229 {
230     if (duty >= Duty_Max)
231     {
232         duty = Duty_Max;
233     Timer1.pwm(canal_pwm, ((long)Bit_max - 1), 20);
234     }
235     else if(duty < Duty_Min)
236     {
237         duty=Duty_Min;
238     }
239
240     if (duty < Duty_Max)
241     {
242         Timer1.setPwmDuty(canal_pwm, duty*(long)Bit_max/Duty_Max);
243     }
244 }
245

```

```
246 //
247 void Painei_Mppt()
248 {
249     switch (modo)
250     {
251         case ligado:
252             ligar_Gate_Driver;
253             if (Painei_Tens < Min_Painei_Tens)
254             {
255                 modo = desligado;
256             }
257             else if (Painei_Pot < Min_Painei_Pot)
258             {
259                 duty = Duty_Max;
260                 modo = mppt;
261             }
262             else
263             {
264                 modo = mppt;
265             }
266             break;
267
268
269         case mppt:
270             if (Ant_Painei_Pot >= Painei_Pot)
271             {
272                 Delta = -Delta;
273             }
274             duty += Delta;
275             Ant_Ant_Painei_Pot = Ant_Painei_Pot;
276             Ant_Painei_Pot = Painei_Pot;
277
278             break;
279
280         case desligado:
281
282             duty = Duty_Ini;
```

```

283     Desligar_Gate_Driver;
284     modo = ligado;
285     //Serial.println("parou");
286
287     break;
288
289     default:
290     Desligar_Gate_Driver;
291     break;
292 }
293 Definir_duty_Mosfet();
294 }
295
296
297 // //para testar o sensor de corrente ptrebotcs
298 void loop() {
299
300
301     c++;
302
303     if (c <= 20000)    //tirar 20000 amostras
304     {
305         Ler_Dados();
306         Painei_Mppt();
307         Serial.print(c);
308         Serial.print(" ");
309         Escrever_Dados_2(duty);
310     }
311     else
312     {
313         Serial.println();
314         while(1)
315         {
316             digitalWrite(led, HIGH);    // ligar led
317             delay(1000);                  // esperar 1s
318             digitalWrite(led, LOW);      // desligar led
319             delay(1000);

```

```
320 Desligar_Gate_Driver;  
321 }  
322 }  
323 }
```

